



Riku Manninen

Tiiviystestilaitteiston suunnittelu ja käyttöönotto

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 30.1.2014

Valvoja: Professori Matti Pietola

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Joonas Korhonen

Tekijä Riku Manninen

Työn nimi Tiivistestilaitteiston suunnittelu ja käyttöönotto

Laitos Koneenrakennustekniikka

Professori Koneensuunnitteluoppi

Professuurikoodi Kon-41

Työn valvoja Professori Matti Pietola

Työn ohjaaja DI Joonas Korhonen

Päivämäärä 30.1.2014

Sivumäärä 99

Kieli suomi

Tiivistelmä

Prosessiteollisuuden pyrkimys kannattavuuden parantamiseksi on kiristänyt tiiviysvaatimuksia venttiilimarkkinoilla. Aikaisemmin venttiilin tiivisteknologian kehittämiseksi sisäistä vuotoa on mallinnettu teoreettisia vuotomalleja käyttäen, kuitenkin huomiotta venttiilin elinkaaren aikana suoritettavaa operointia. Tämän työn tarkoituksena on valmistaa venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti simuloiva laitteisto sulkuventtiilin tiivistekijöiden tutkimiseen.

Työn teoriaosassa on selvitetty kirjallisuustutkimuksen keinoin 1) operoinnin vaikutus sulkuventtiiliin, 2) sisäiseen vuotoon vaikuttavat tiivistekijät, ja 3) vuodonmittaamiseen käytetyt menetelmät. Työn kokeellisen osan alussa on esitetty tuotekehitysprojektin lähtökohtana toimineen staattisen tiivistestilaitteiston rakenne ja toimivuuden johdopäätökset. Tuotekehitysprojektissa dynaamisen tiivistestilaitteiston suunnittelutyössä käytetään järjestelmällistä koneensuunnittelun menetelmää yhdessä tietokoneavusteisen suunnittelun kanssa.

Tuotekehitysprojektin lopputuloksena on kehitetty kaksi prototyyppiä dynaamiselle tiivistestilaitteistolle. Toiselle prototyypille suoritettiin laitteiston käyttöönottotestaus, jossa eri koekappaleiden vuototuloksien luotettavuutta tarkasteltiin toistettavuustesteillä vertaamalla vuotoarvojen hajontalukuja samansuuruisia tiivistekijöitä käyttämällä. Käyttöönottotestin perusteella valittiin ideaalisin koekappaleen kiinnitystapa ja suoritettiin käytäntöön perustuvaa tarkastelua laitteiston toimivuudesta.

Käyttöönottotestien perusteella laitteiston rakenne ja toimintaperiaate on onnistunut sekä toimiva. Tämän työn vuototulokset ovat yhteneviä Hauhian vuotomallin kanssa käytettäessä venttiilin eri tiivistekijöitä. Toistettavuustesteissä laitteistolla saatujen vuotoarvojen virhemarginaaliksi tuli ± 12 %. Laitteistolla voidaan tutkia tasomaisen tiivistepinnan materiaalin, pinnankarheuden, pintapaineen, operoinnin, voiteluaineen ja kaasuväliaineen paineen sekä lämpötilan vaikutusta vuotoarvoon luotettavammin kuin teoreettisia vuotomalleja käyttämällä.

Avainsanat Venttiili, operointi, tiiviys, vuoto, kaasua

Author Riku Manninen

Title of thesis Designing and verifying of tightness test instrumentation

Department Engineering Design and Production

Professorship Machine design

Code of professorship Kon-41

Thesis supervisor Professor Matti Pietola

Thesis advisor M.Sc. (Tech) Joonas Korhonen

Date 30.1.2014

Number of pages 99

Language english

Abstract

The aim to improve the profitability in the process industry has increased the tightness requirements on the valve markets. Usually, in the development of the valve tightness technology the internal leakage has been modelled with theoretical leak models, without taking into account the operation during the life cycle of the valve. The goal of this work is to design and manufacture an instrumentation to investigate the tightness factors of the shut-off valves to simulate as realistically as possible the operation of the valve.

In the theoretical part of this work, a literature review was utilized to explain 1) the effect of the operation to the shut-off valve, 2) the tightness factors affecting internal leakage, and 3) the methods for leak measurements. In experimental part, the design and conclusions on the functionality of the static tightness test instrumentation was described, which was a starting point for the research and development project. A systematic machine design method together with a computer-aided design was used in designing the dynamic tightness test instrumentation.

As a result of this work, two prototypes of dynamic tightness test instrumentation were developed. For the second prototype a verifying test was performed, where the reliability of test specimen leak result was examined with the repeatability test by comparing leakage values dispersion by using equal tightness factors. In addition, during the verifying test the ideal fasten method of a test specimen was selected and review of functionality of the instrumentation was examined based on operation.

According to verifying test results, the instrumentation construction and operation principle was successful and operational. The leak test results presented in this work are consistent with Hauhia's leak model when different tightness factors of the valves were used. Based on the repeatability test, the error estimation for the instrumentation's leak value was ± 12 %. The instrumentation can be used to investigate an influence of a flat sealing surface material, surface roughness, surface pressure, operation, lubricant and medium pressure, and temperature on the leakage value more reliably than with theoretical leak models.

Keywords Valve, operation, tightness, leakage, gas

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Metso Automation Oy:n tuotekehitysosastolle Vantaan Hakkilassa. Haluan kiittää tuotekehityspäällikköä DI Jari Ruhasta mahdollisuudesta tehdä työ mielenkiintoisesta aiheesta.

Kiitän erityisesti diplomityön ohjaajaa DI Joonas Korhosta asiantuntevasta avusta työn toteutuksen aikana ja kirjallisuustyön viimeistelyyn saamastani palautteesta. Lisäksi haluan kiittää Metso Automation Oy:n virtauslaboratorion henkilökuntaa käytännön avusta, ja erityisesti DI Tero Hannolaa mittaustekniikkaa valottavista neuvoista ja laitteiston kehitystyötä eteenpäin vieneistä arvokkaista mielipiteistä.

Lopuksi haluan kiittää diplomityön valvojaa professori Matti Pietolaa työn tekoon saamistani neuvoista ja työni oikolukemisesta siskoani FT Hanna Mannista.

Espoo 30.1.2014

Riku Manninen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	7
1 Johdanto	9
1.1 Taustaa	9
1.2 Tutkimusongelma	9
1.3 Työn tavoite ja rajaukset	10
2 Metso venttiilien valmistajana	11
3 Neles -tuotelinjan sulkuventtiilit	13
3.1 Rakenne	13
3.2 Toimintaperiaate	15
3.3 Tiivistymisperiaate	17
4 Operoinnin vaikutus sulkuventtiiliin	19
4.1 Tiivistepintojen välinen kosketus	19
4.2 Liukuva kosketus	20
4.3 Kuluminen	21
4.4 Voitelu	25
4.5 Materiaalien tribologiset ominaisuudet	27
5 Sulkuventtiilin sisäinen vuotaminen	29
5.1 Putkistovirtauksen käyttäytyminen	29
5.2 Ideaalikaasut	30
5.3 Vuototeoriaa	31
5.4 Vuotoon vaikuttavat tekijät	33
5.5 Hauhian vuotomalli	35
5.6 Vuotostandardit	36
6 Vuodonmittaaminen	37
6.1 Venttiilin vuodon mittaussmenetelmät	37
6.2 Muut vuodon mittaussmenetelmät	37
7 Väliaineen paineen mittaaminen	40
7.1 Paineen mittaussmenetelmät	40
7.2 Paineen mittausslaitteen kalibrointi	41
7.3 Paineen mittausslaitteen valinta	42
8 Väliaineen lämpötilan mittaaminen	43
8.1 Lämpötila väliaineessa	43
8.2 Lämpötilan mittaussmenetelmät	43
9 Staattinen tiiviystestilaitteisto	48
9.1 Rakenne	48
9.2 Toimintaperiaate	49
9.3 Testaus	49
9.4 Laitteiston toimivuuden johtopäätökset	50
10 Dynaamisen tiiviystestilaitteiston luonnostelu	52
10.1 Vaatimuslista	52
10.2 Vaatimuslistan abstrahointi	52
10.3 Toimintorakenteen laatiminen	53
10.4 Vaikutusperiaatteiden haku ja konkretisointi	54
10.5 Ratkaisuperiaatteiden yhdistäminen	54
10.6 Sopivien periaateyhdistelmien valinta	55

10.7	Periaateyhdistelmien vertailu.....	56
10.8	Valitun periaateyhdistelmän pohjalta tehty luonnos.....	57
11	Dynaamisen tiiviystestilaitteiston kehittäminen	59
11.1	Laitteiston suunnittelu ja valmistaminen	59
11.2	Ensimmäinen prototyyppi.....	59
11.2.1	Rakenne.....	59
11.2.2	Koekappaleet.....	60
11.2.3	Toimintaperiaate	61
11.2.4	Laitteiston testaaminen	63
11.2.5	Johtopäätökset.....	64
11.3	Toinen prototyyppi	68
11.3.1	Rakenne ja toimintaperiaate.....	68
11.3.2	Runko	69
11.3.3	Koekappaleet ja niiden valmistelu	70
11.3.4	Pintapaineen muodostaminen	73
11.3.5	Operointi	73
11.3.6	Vuodonmittaus	74
12	Dynaamisen tiiviystestilaitteiston käyttöönottestit	76
12.1	Laitteiston ominaisuudet ja rajoitukset.....	76
12.2	Laitteiston koeponnistus	76
12.3	Käyttöönottestiohjelma.....	77
12.4	Käyttöönottestien valmistelut	77
13	Testitulokset.....	80
14	Johtopäätökset.....	90
15	Tiiviystestilaitteiston jatkokehittäminen	92
16	Yhteenveto	93
17	Lähdeluettelo.....	95
	Liiteluettelo	99
	Liitteet	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

A	$[\text{mm}^2]$	tiivistepinnan pinta-ala
B		kanavakerroin
F	$[\text{N}]$	voima
F_N	$[\text{N}]$	normaalivoima
F_μ	$[\text{N}]$	kitkavoima
M	$[\frac{\text{kg}}{\text{mol}}]$	kaasun moolimassa
\dot{Q}	$[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$	vuotomäärä
R	$[8314,3 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}]$	yleinen kaasuvakio
R_0	$[\Omega]$	nollapisteen resistanssi
R_a	$[\mu\text{m}]$	pinnankarheuden keskipoikkeama
R_z	$[\mu\text{m}]$	pinnankarheuden maksimiprofiilinsyvyys
S	$[\text{mm}]$	liukumismatka
T	$[\text{K}]$	kaasun lämpötila
T_a	$[\text{K}]$	lämpötila alussa
T_{avg}	$[\text{K}]$	lämpötilan keskiarvo
T_l	$[\text{K}]$	lämpötila lopussa
V	$[\text{mm}^3]$	kulunut materiaalitilavuus
V_k	$[\text{m}^3]$	kaasun tilavuus
γ	$[\frac{1}{\text{K}}]$	tilavuuden lämpölaajenemiskerroin
g_i		painokerroin
m	$[\text{mg}]$	kaasun massa
n	$[\text{mol}]$	kaasun ainemäärä
p	$[\text{bar} = 1000 \text{ hPa}]$	paine
p_0	$[1013,25 \text{ hPa}]$	normaali ilmanpaine
p_1	$[\text{Pa}]$	tulopuolen paine
p_2	$[\text{Pa}]$	jättöpuolen paine
p_a	$[\text{bar} = 1000 \text{ hPa}]$	paine alussa
p_l	$[\text{bar} = 1000 \text{ hPa}]$	paine lopussa
q_c	$[\text{MPa}]$	tiivistepintojen välinen pintapaine
q_m	$[\frac{\text{kg}}{\text{s}}]$	massavirta

q_v	$[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$	tilavuusvirta
r	$[\mu\text{m}]$	vuotoraon säde
r_o	$[\text{m}]$	tiivisteen ulkosäde
r_1	$[\text{m}]$	tiivisteen sisäsäde
x	$[\text{Pa}]$	projektio pinta-alan pintapaine
v	$[\frac{\text{m}}{\text{s}}]$	liikenopeus
w_j		arviointikriteerin arvokäsitys
η	$[\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}]$	dynaaminen viskositeetti
θ		materiaalin kulumisnopeus
λ		voiteluaineen ominaisuuspaksuus
μ		kitkakerroin
ρ	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$	tiheys
τ	$[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}]$	leikkausjännitys
φ	$[\text{°}]$	kontaktikulma
Δp	$[\text{Pa}]$	paineenmuutos
Δt	$[\text{s}]$	ajanmuutos
ΣR_a	$[\mu\text{m}]$	tiivistepintojen yhteenlaskettu pinnankarheus

AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
CAD	Computer-aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
FC	Flow Control business unit of Metso
FCI	Fluid Controls Institute
ISO	International Organization for Standardization
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
MA	Metso Automation Oy
MI	Mineral Insulated Thermocouple Cable
NI	National Instruments
NTP	Normal Temperature and Pressure

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Venttiileitä käytetään prosessilaitosten järjestelmien ohjaukseen. Järjestelmien prosessihallinnalla pyritään parantamaan itse prosessin tehokkuusastetta ja vähentämään siitä muodostuvia ympäristöhaittoja. Häiriöt venttiileissä haittaavat usein koko järjestelmän toimintaa, joten venttiilin suorituskkyky vaikuttaa suoraan prosessin laatuun ja kustannuksiin. Yksi tärkeimmistä venttiilin suorituskkykyyn vaikuttavista tekijöistä on sen tiiviys, josta on muodostunut merkittävä kilpailutekijä venttiilivalmistajien välillä. Venttiiliasiakkaiden kiristyneet tiiviysvaatimukset asettavat suuria haasteita venttiilien tiivisteknologian kehittämiseksi. Prosessiventtiileitä valmistetaan jatkuvasti kehittyviin prosessin eri käyttötarkoituksiin, jonka johdosta uusia materiaaleja venttiilin rakenteissa tulee ottaa käyttöön parhaan mahdollisen tiiviyn muodostamiseksi.

1.2 Tutkimusongelma

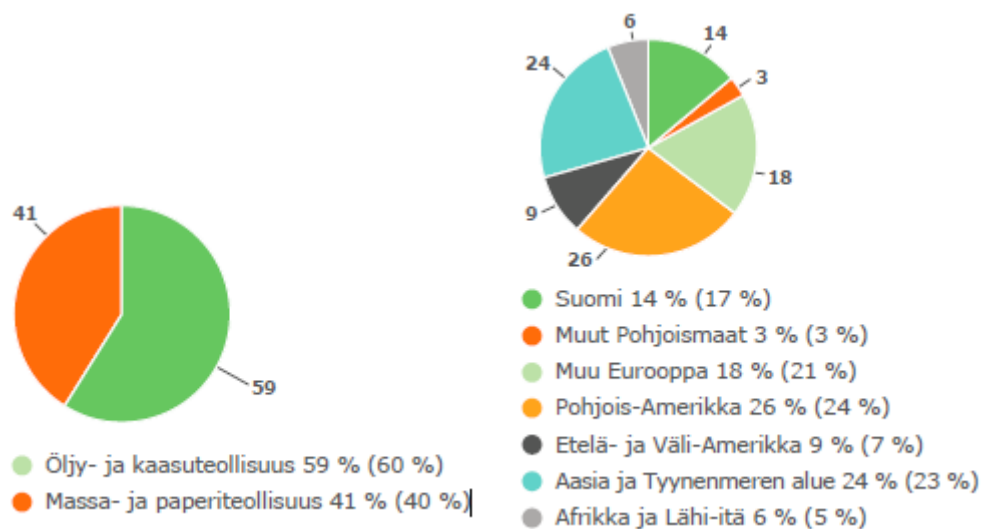
Venttiilin tiiviys testataan ainoastaan sen kokoonpanon jälkeen ennen sen toimittamista asiakkaalle. Sen jälkeen kun venttiili asennetaan prosessin putkistoon, materiaalien sekä muiden venttiilin tiivistekijöiden vaikutuksia venttiilin nykyiseen vuotoon ei enää todellisuudessa tiedetä. Prosessissa venttiiliä operoidaan sen aukioloastetta muuttamalla prosessijärjestelmien virtauksien ohjauksen mahdollistamiseksi. Venttiilin operointi muuttaa venttiilin tiivistekijöitä ja siten venttiilin vuotoa sen elinkaaren aikana. Venttiilin vuodosta on julkaistu monia teoreettisia vuotomalleja vuodonennustamiseen eri tiivistekijöitä käyttämällä. Kuitenkin vuotomallien arvioidun venttiilin vuodon virhemarginaalit ovat varsin suuria, joten kokeellinen tiivistekijöiden tutkiminen on tarpeellista. Suurten kustannusten vuoksi tiivistekijöiden vaikutusta vuotoon ei ole edullista tutkia kokonaisilla prosessiventtiileillä. Lisäksi kokonaisilla venttiileillä yksittäisten tutkittavien tiivistekijöiden hallitseminen on haastavaa. Tämän vuoksi tiivistekijöiden tutkiminen kokeellisesti on edullisempaa suorittaa venttiiliä simuloivalla ratkaisulla.

1.3 Työn tavoite ja rajaukset

Tämän diplomityön tavoitteena on suunnitella ja ottaa käyttöön laitteisto venttiilin tiivistekijöiden tutkimiseen. Laitteiston lähtökohtana toimi jo ennestään kehitetty ilman operointitoimintoa varustettu staattinen tiivistestilaitteisto. Tuotekehitysprojektin tarkoituksena on kehittää dynaaminen tiivistestilaitteisto, joka operointitoiminnoltaan simuloi venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti. Laitteistolla on tarkoitus vertailla tiivistekijöiden vaikutuksia vuotoon operointikulumisen suhteen. Laitteistolla tutkitaan ainoastaan venttiilin suljinelimen ja tiivisteen välistä vuotoa sekä sulkuventtiilin vuotoon vaikuttavia tiivistekijöitä. Laitteistolla saadut vuototulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia venttiilin vuotoarvoon vaan toimivat vertailuarvoina tiivistekijöiden kesken. Saatujen vertailutulosten perusteella on mahdollista laatia suunnitteluohjeita venttiilin suunnitteluun.

2 Metso venttiilien valmistajana

Metso on kansainvälinen teknologiayritys prosessiteollisuudelle kaivos-, maarakennus-, kierrätys-, massa- ja paperi-, voimantuotanto- sekä öljy- ja kaasualalla. Metson liiketoiminta jaetaan kahteen raportointisegmenttiin: Kaivos ja maarakennus sekä Automaatio. Metso Automation Oy (MA) toteuttaa automaatio-ratkaisuja ja -palveluita teollisuusasiakkaidensa tuotantoprosesseihin kolmessa liiketoimintalinjassa: Prosessiautomaatiojärjestelmät, Virtauksensäätöratkaisut (FC) ja Palvelut. MA:n suurimpien asiakasteollisuuksien öljy- ja kaasuteollisuuden sekä massa- ja paperiteollisuuden lisäksi sillä on myös vahvaa osaamista kaivos- ja maarakennusteollisuudessa sekä voimantuotannossa. MA:n asiakaskunta on globaali jakautuen saatujen tilausten perusteella markkina-alueittain vuonna 2012 kuvan 1 kaltaisesti. Vuonna 2012 MA:n liikevaihto oli 859 M€ muodostuen kahdesta asiakassegmentistä kuvan 1 mukaisesti. [1]



Kuva 1. Vasemmassa kaaviossa on MA:n asiakasteollisuuksien osuudet liikevaihdosta vuonna 2012 ja oikeassa kaaviossa saatujen tilausten osuudet markkina-alueittain. Suluissa olevat prosenttiosuudet ovat vuoden 2011 vastaavat arvot [1].

Metso on valmistanut globaalisti prosessiventtiilejä lähes 90 vuoden ajan. MA:n viimeisempänä strategiana on ollut laajentaa ja kehittää venttiilivalikoimaansa kasvavalle öljy- ja kaasuteollisuudelle. Nykyään Metson virtauksensäätöratkaisut öljy- ja kaasuteollisuudelle edustavat lähes puolet MA:n liiketoiminnasta, ja monista Metson venttiiliratkaisuista on tullut teollisuusstandardeja tällä alalla. Metson laaja tuotevalikoima, vahva teknologiakehitys ja maailmanlaajuinen tuotanto- sekä palveluverkosto muodostavat toimivan pohjan liiketoiminnan kehittämiseksi tulevaisuudessa. Metso valmistaa FC -

liiketoimintalinjassaan säätö- ja sulkuventtiileitä täydellisinä virtauksensäätöratkaisuin, joihin kuuluu venttiilin lisäksi sen toimintaa ohjaavat toimilaite ja asennoitin. Nykyään FC:n prosessiventtiilien valmistus tapahtuu kolmessa eri tuotelinjassa

- Neleksessä,
- Jamesburyssa,
- ja Mapagissa. [2]

Metson venttiililiiketoiminta alkoi Antti Nelimarkan ja Eino Santasaloon perustamasta suomalaisesta Neleksestä vuonna 1956. Neleksen toiminta venttiiliyrityksenä alkoi monien sattumien summana selluteollisuuden sulkukäyttöön tarkoitetuilla läppä- ja palloventtiileillä 1960-luvun alussa. Neleksen venttiilit ovat olleet kautta aikojen tunnettu korkea suorituskykyisestä metallitiivistyksestä. Neleksen venttiilivalikoima painopiste on myöhemmin siirtynyt enemmän säätöventtiileihin ja digitaaliseen virtauksensäätöteknologiaan. Nykyään Neles -tuoteperheeseen kuuluu viisi eri venttiilityyppiä: läppä-, pallo-, segmentti-, Finetrol- ja Rotary Globe -venttiilit. Neles -tuoteperheeseen kuuluu venttiileiden lisäksi niihin tarkoitettuja monia toimilaite- ja asennoitinmalleja. [3]

Toinen FC:n tuotelinjoista Jamesbury perustettiin Yhdysvalloissa vuonna 1954. Jamesbury on toiminut historiansa aikana erityisesti edelläkävijänä pehmeätiivisteisten pallo- ja läppäventtiilien valmistamisessa. Useita pehmeä tiivistystekniikoita kehittänyt Jamesbury on kasvattanut pallo- ja läppäventtiilien elinkaarta sekä sovelluksien määrää. Neles ja Jamesbury yhdistyivät laajentaakseen venttiilitietämystään eri tiivistystekniikoiden välillä vuonna 1988. Jamesbury -tuoteperheeseen kuuluu pallo- ja läppäventtiilit sekä niihin tarkoitettut toimilaite- ja asennoitinmallit. [3]

Metso osti FC:n kolmannen tuotelinjansa saksalaisen Mapagin vuonna 2011. MA halusi Mapagin hankinnalla vahvistaa strategiaansa laajentamalla venttiilivalikoimaansa öljy- ja kaasuteollisuusasiakkaille. Mapagin venttiiliratkaisut täydentävät MA:n venttiilitarjontaa erityisesti vaativissa sovelluksissa, joissa vaaditaan erikoismateriaaleja, erityisiä lämpötilan kestoja tai korkeita paineita. [4] Lisäksi Metso osti venttiili tuotevalikoiman lisäämiseksi eteläkorealaisen venttiilivalmistajan Valstone Controlin vuonna 2012. Hankinnan tarkoituksena oli vahvistaa istukkasäätöventtiilien tarjontaa öljy- ja kaasuteollisuuteen ja voimantuotantoon Aasian kasvavilla markkinoilla. [5]

3 Neles -tuotelinjan sulkuventtiilit

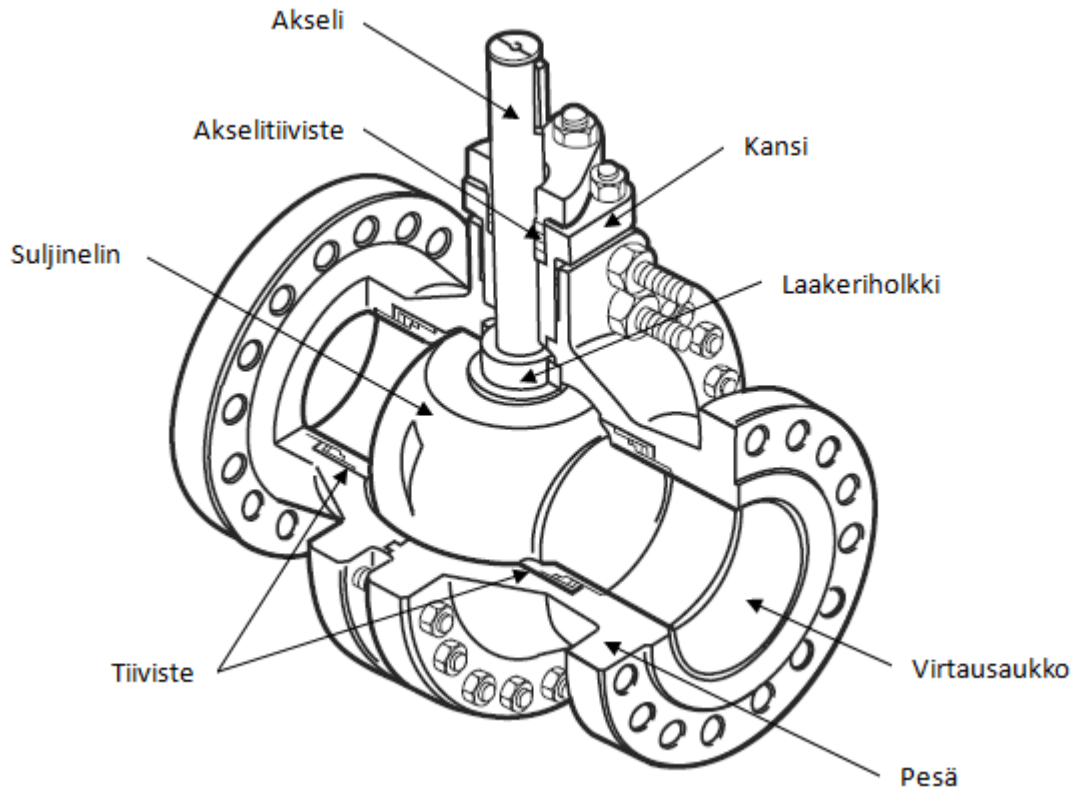
3.1 Rakenne

Venttiilit voidaan jakaa sekä käyttötarkoituksensa että tyyppinsä mukaan. Venttiilin pääasiallisena tehtävä putkistossa on sulkea, säätää tai sallia virtausta. Sulkuventtiili on tarkoitettu putkistovirtauksen sulkuun, ja vastaavasti säätöventtiili putkistovirtauksen säätöön kuristamalla virtausta säätöelimellä. Edelleen sulku- ja säätöventtiilit voidaan puolestaan jakaa eri tyyppeihin: kiertöventtiilit, nostoventtiilit, liukuventtiilit ja mäntäventtiilit. Neles -tuotelinjan sulkuventtiilit, pallo- ja läppäventtiilit, ovat tyypiltään neljänneskiertöventtiileitä. [6]

Neles -tuotelinjassa on useita palloventtiilisarjoja. Palloventtiilisarjat jaetaan tiiviste-tuettuihin, laakeroituihin, keraamisiin ja korkeapaine palloventtiileihin. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen laakeroidun palloventtiilin rakenne. Palloventtiilin runko koostuu kahdesta teräksisestä pesän puolikkaasta, jotka kiinnitetään toisiinsa venttiilin jakotasos-ta. Venttiilin pesämateriaaliksi valitaan yleensä tavallinen hiiliteräs, jos venttiililtä ei vaadita korkean tai matalan lämpötilan tai korroosion kestoja. Haponkestävä teräs taas kestää huomattavasti paremmin vaativampia olosuhteita. Venttiilin muissa osissa käyte-tään erikoismateriaaleja ja pinnoitteita. Palloventtiilissä suljinelin - pallo ja akseli - voi koostua joko yhdestä kappaleesta eli varsipallosta, joka on esitetty kuvassa 2, tai akseli-napaliitoksella yhdistettävistä kappaleista. Varsipallo laakeroidaan kahdella laakerihol-killä pesien väliin molemmin puolin. Pallon rakennemateriaali on lähes aina teräs tai myös keraami riippuen putkistovirtauksen ominaisuuksista. Venttiilin rungon ja pallon sisäpuolella oleva kanava muodostaa putkistovirtauksen virtausaukon. [7]

Putkistovirtaus suljetaan tai sallitaan pallon ja tiivisteiden välisellä tiivistyksellä. Mo-lempaan virtaussuuntaan tiivis palloventtiili vaatii tiivisteet pallon molemmin puolin. Kaksoistiivisteisissä palloventtiileissä tiivisteet erotetaan tulo- ja jättöpuolen tiivisteisiin virtaussuunnasta riippuen. Tiivisteet asennetaan pesien upotuksiin tiivistämällä pesän ja tiivisteiden välinen kontakti takatiivisteellä sisäisen vuodon välttämiseksi. Palloventtiilin suljinelimen ja tiivisteiden välinen kontakti voidaan toteuttaa kovalla metallisella tai pehmeällä muovisella tiivistyksellä. Venttiilin tiivistyksen valinnalla vaikutetaan vent-tiilin tiiviyyteen peruskonstruktion pysyessä samana. Pehmeä muovitiivistys on helpompi saada tiiviimmäksi kuin kova metallitiivistys, koska pehmeät aineet täyttävät tiiviste-

pinnassa olevat epätasaisuudet paremmin. Kuitenkin vaativissa prosessiolosuhteissa muovin ongelmat tulevat esiin, sillä se on soveltumaton korkeisiin lämpötiloihin ja virtauspaineisiin päinvastoin kuin metallitiivistys. Venttiilin ulkoisen vuodon välttämiseksi toimilaitteelle johdettava akseli tiivistetään akselitiivisteillä ja kannella. [7]



Kuva 2. Kuvassa on esitetty laakeroidun palloventtiilin rakenne leikattuna ja merkitty nuolin sen tärkeimmät osat [8].

Neles -tuotelinjan kaikki läppäventtiilisarjat ovat toteutettu metallitiivistyksellä. Erilaiset läppäventtiilisarjat ovat toimintaperiaatteeltaan sekä rakenteeltaan samankaltaisia, mutta niiden asennustyyppit ja käyttökohteet vaihtelevat. Läppäventtiileissä on neljä eri putkistoasennustyyppiä: laipaton, korvakkeellinen, kaksilaippainen ja hitsauspääteellinen. Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen läppäventtiiliyhdistelmä. Läppäventtiili eroaa palloventtiilistä osien rakenteesta ja siten myös tiivistysperiaatteeltaan. Läppäventtiili tärkeimmät osat koostuvat pesästä eli rungosta, kahdesta akselista, tiivisteestä, laipparankaasta ja suljinelimestä eli läpästä. Läppäventtiilissä putkistovirtausta suljettaessa muodoltaan levymäinen läppä käännetään tiivisterenkaan ympärille tiivistyksen muodostamiseksi. [7]



Kuva 3. Kaksilaippaisen läppäventtiiliyhdistelmän kokoonpano. Kuvassa vasemmalla musta on asennoitin, keskellä sininen toimilaite ja oikealla harmaa läppäventtiili. [7]

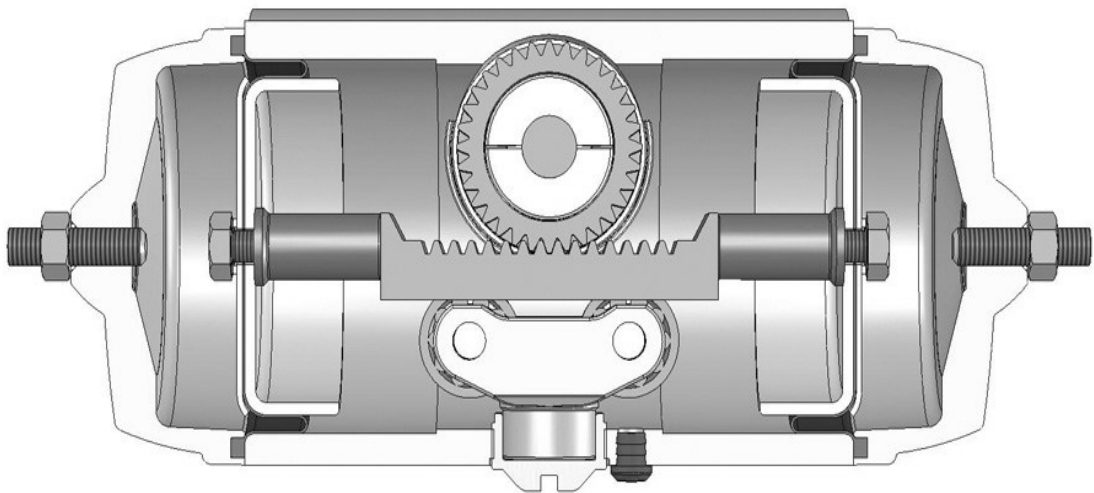
Venttiilit liitetään pesien laipoistaan kiinni putkistoon. Prosessiventtiilin laipat ja sen muut ulkomitat on standardoitu, jotta liitäntämitat venttiilin ja putkiston välillä vastaa- vat toisiaan. Liitäntämittojen standardeja on useita kansallisuudesta riippuen. Standardit eivät vaikuta venttiilin sisäosien suunnitteluun ja mitoitukseen, eikä täten venttiilin tii- viyteen. [9] Venttiilin kokoluokka määräytyy sen virtausaukon halkaisijan mukaan, mi- kä on lähes poikkeuksetta yhtä suuri kuin putkiston halkaisija. Neles -tuotelinjan sulk- venttiilit ovat virtausaukon halkaisijaltaan välillä 0,5–80 tuumaa (10–2000 mm). Vent- tiilin paineluokka ilmoittaa maksimaalisen suljineliimen erottaman virtauksen paine-eron venttiilin tulo- ja jättöpuolen välillä. Paineluokka ilmoitetaan yleensä amerikkalaisella asteikoilla paunaa per neliötuuma [lb/in^2]. Neles -tuotelinja tarjoaa venttiileitä ANSI 150–2500-paineluokien välillä. [6]

3.2 Toimintaperiaate

Prosessin putkiston virtausta säädettyäessä sulkuventtiili ohjataan joko auki tai kiinni asentoon. Kiinni asennossa venttiili estää virtauksen ja auki asennossa virtaus sallitaan. Venttiilin aukioloastetta ohjataan ulkoisesti kiertämällä suljineliintä. Venttiilin ulkoinen ohjaaminen välitetään suljineliimeen liitettyllä akselilla. Akselia ohjattaessa puhutaan vent- tiiliin operoimisesta. Venttiilin aukioloastetta eli suljineliimen asentoa voidaan säädellä joko manuaalisesti käsiohjauksella tai automaattisesti toimilaitteella. [10] Yleisissä venttiiliratkaisuissa operointi toteutetaan pneumaattisesti automaattisella toimilaitteella. Automaattisella toimilaitteohjauksella valinnalla parannetaan prosessijärjestelmän hal- lintaa. Myös venttiilin luoksepääsemättömyys, liiallinen operointi momentti, turvalli-

suus ja hätäsulku vaatimukset voivat olla tekijöitä automaattisen toimilaitteohjauksen valintaan. Automaattista toimilaitetta ohjataan siihen liitettyllä elektronisella asennoittimella. [11]

Venttiilin operoinnin mahdollistava toimilaitteen akselin ulostulomomentti tulee määrittää vastaamaan tarvittuun venttiilin sulkumomenttiin nähden. Neleksen neljänneskiertoventtiilien etuna täyskiertoventtiileitä nähden on suhteellisesti pienempi voiman kulutus operoinnissa. Kuvassa 4 on esitetty venttiilin kaksoiskalvotoimilaitteen rakenne, joka on suunniteltu sekä säätö- että sulkukäyttöön. Kaksoiskalvotoimilaitteessa on kaksi vastakkaisiin suuntiin operoivaa kalvomäntää, jossa kalvojen helmat rullaavat toimilaitteen sylinteripintoja pitkin syötetyn paineilman vaikutuksesta. Kalvot kääntävät välyksettömän hammasvälityksen avulla toimilaitteen ulostuloakselia, johon venttiilin akseli on liitetty puristus- ja kiilaliitoksella. Ulostuloakselin kääntymä on 90° , jota voidaan säätää $0-90^\circ$ välillä iskun päissä olevilla rajoitusruuveilla. Kyseiseen toimilaitteeseen voidaan asentaa erillinen jousipaketti, jos venttiilin avaamiseen tai sulkemiseen halutaan erillinen luotettava hätätoiminto. Tällöin venttiili sijaitsee tyypillisesti prosessin kriittisessä kohdassa. [11]



Kuva 4. Kuvassa on pneumaattisen kaksitoimisen kaksoiskalvotoimilaitteen rakenne puolileikattuna [11].

Venttiilin operoinnin sulkumomenttiin vaikuttavat monet tekijät. Palloventtiileissä erityisesti tiivisteiden materiaalin johdosta kitkakerroin on otettava huomioon. Myös prosessista riippuvat putkistovirtauksen ominaisuudet - lämpötila, paine, virtausnopeus ja viskositeetti - vaikuttavat tarvittavan sulkumomentin suuruuteen. Erityisesti läppäventtiili-

lissä suljineliimen muodosta johtuen putkiston virtausnopeudella on suuri vaikutus vääntövaatimuksiin. [9] Venttiilin operoinnissa on myös syytä tutkia siitä aiheutuvien kuormitusten vaikutuksia venttiilin liikkuviin osiin. Suljineliimen ja akselin välisten tiivistimien ja laakerien materiaalit sekä välykset ovat määritettävä sellaisiksi, jotta operoinnissa aiheutuvat kuormat jakautuvat tasaisesti liikkuvien pintojen välillä. Kuormitusten jakautuessa epätasaisesti liikkuvien osien välillä haitallinen kuluminen on mahdollista. Haitallinen kuluminen voi aiheuttaa tarvittun sulkumomentin arvon muuttumisen tai pahimmassa tapauksessa venttiilin toimintakelvottomuuden. [12]

3.3 Tiivistymisperiaate

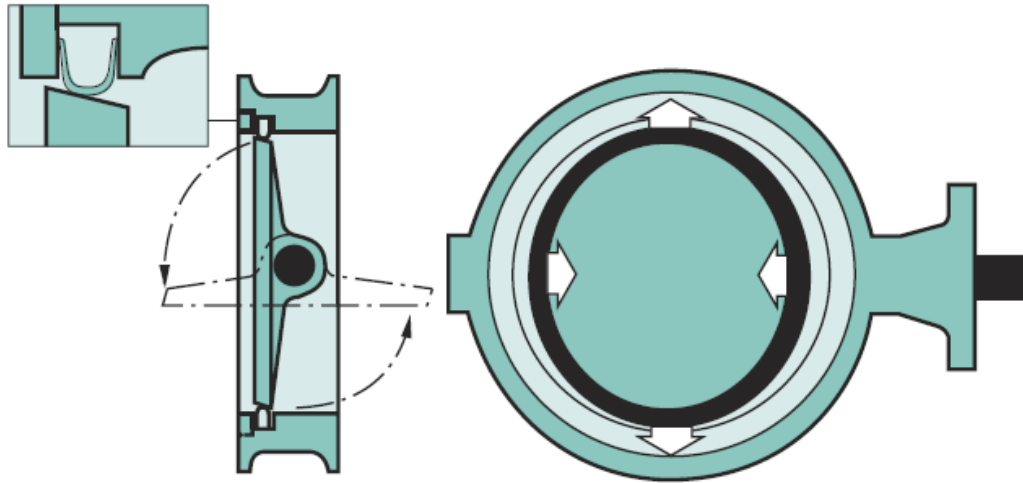
Venttiilin yksi tärkeimmistä tehtävistä on tiiviyn takaaminen suljineliimen ja sen tiivistimen välillä. Venttiiliä pidetään tiiviinä, jos se ei vuoda lainkaan, tai jos se vuotaa sille sallitun määrän. Sallittu vuotomäärä on riippuvainen asiakkaan määrittämästä prosessijärjestelmän vaatimuksista. Tiiviys ilmaistaan vuotona, jota mitataan tilavuuden tai paine-eron muutoksena ajan suhteen. Venttiilin vuotaminen on seurausta tiiviyn epäonnistumisesta, joten vuotaminen on venttiilin tiiviyn käänteisarvo. Venttiilin vuoto voidaan jakaa sisäiseen ja ulkoiseen vuotoon. Ulkoisella vuodolla tarkoitetaan putkistovirtauksen vuotoa venttiilistä ympäristöön. Näitä vuotoreittejä ovat

- pesän laippapinnan ja putkiston välinen vastinpinta,
- akselin tiivistys,
- venttiilin jakotaso,
- ja pesän muotovirheet valmistuksessa kuten huokokset.

Ulkoinen vuoto on seurausta asennuksen epäonnistumisesta ja venttiilinosien suunnittelu- tai valmistusvirheistä. Sisäisellä vuodolla tarkoitetaan kiinni olevan venttiilin läpi menevää putkistovirtausta. Sisäinen vuoto tapahtuu suljineliimen ja tiivisteen välistä tai tiivisteen ja pesän välistä. Eri sulkuventtiilityypeissä sisäisen vuodon estäminen mahdollistetaan erilaisin tiivistymisperiaatein. [9]

Läppäventtiilissä läppä on suunniteltu pesään nähden kolmeen suuntaan epäkeskeiseksi. Tarkoin toleranssein työstetty läpän tiivistepinta on muodoltaan kartioellipsi. Kuvassa 5 venttiilin sulkeutuessa kartioelliptinen läpän tiivistepinta työntää läppäventtiilin rungos-

sa kiinteästi olevaa tiivisterengasta isomman akselin suuntaisesti ulospäin, jolloin tiivisterengas puristuu läppää vasten pienemmän akselin suuntaisesti saaden aikaan tiiviin viivamaisen kontaktipinnan läpän ja tiivisteiden välille. Venttiiliä avatessa kosketus irtaantuu ja tiivisterengas palautuu alkuperäiseen pyöreään muotoonsa. [13]



Kuva 5. Kuvassa on esitetty läppäventtiilin tiivistysperiaate läpän ja tiivisterengaan välillä venttiiliä operoitaessa [13].

Tiivistetuetussa palloventtiilissä palloa ei ole laakeroitu pesään kuten kuvassa 2 esitettiin. Tässä tapauksessa akseli ja pallo on liitetty toisiinsa vetokappaleella, joka välittää akselin kiertoliikkeen palloon. Venttiili on aina kaksitiivisteinen eli tiivis molempiin virtaussuuntiin. Tiivistysperiaate perustuu putkistovirtauksen aiheuttamasta paineesta venttiilin tulopuolella palloa kohti. Venttiilin yli vaikuttava paine-ero painaa palloa jättopuolen tiivistettä vasten muodostaen tiivistävän pinnan. Laakeroidussa palloventtiilissä pallo on laakeroitu pesään kuvan 2 tapaan, jossa akselinapaliitoksella yhdistetyn akselin hammastus välittää kiertoliikkeen suoraan palloon. Tapauksessa tiivisteet ovat jousikuormitteisia, jossa tiivistysperiaate tapahtuu jousien painaessa tiivisteitä palloa vasten ja putkistopaineen vaikuttaessa tulopuolen tiivisteeseen. Tiivistävä pinta muodostuu laakeroidussa palloventtiilissä tulopuolen tiivisteiden ja pallon välille. Laakeroitu palloventtiili voidaan tehdä tiiviiksi molempiin virtaussuuntiin tai ainoastaan toiseen suuntaan. [14]

Erilaisista tiivistysperiaatteista johtuen yleisesti ottaen metallitiivisteisiä palloventtiilejä käytetään vaativissa olosuhteissa kestävän rakenteen ja varmatoimisen toimintaperiaatteen ansiosta. Puolestaan läppäventtiilien käyttökohteiden vaatimukset eivät ole yhtä vaativia kuin palloventtiileillä. [9]

4 Operoinnin vaikutus sulkuventtiiliin

4.1 Tiivistepintojen välinen kosketus

Venttiilin sulkuelimen ja tiivisteiden välillä pyritään mahdollisemman tasaiseen kontaktiin. Tiivistepintojen väliseen kontaktiin vaikuttavat kuormitusolosuhteet, käytetyt pinnoitteet, sulkuelimen ja tiivisteiden geometria sekä pinnankarheus. Nämä tekijät vaikuttavat kontaktin lisäksi liikkuvien komponenttien väliseen kitkaan. Sulkuelimen ja tiivistimen yhteensopivuus ja toiminta vaikuttavat puolestaan venttiilin kulutuskestävyyteen ja tarvittuun sulkumomenttiin. [6]

Tiivistepintojen välistä puristuvuutta toisiaan vasten kuvataan pintapaineella. Venttiilissä pintapaine on riippuvainen venttiilin kohdistuvasta putkistovirtauksen aiheuttamasta paine-erosta tulo- ja jättopuolen välillä sekä tiivistepinnan geometriasta. Venttiilin riittävää pintapaineen suuruutta voidaan tarkastella tiivistekertoimen avulla. Sopivan tiivistekertoimen valinnalla varmistetaan riittävä puristuvuus tiivistepintojen välillä. Pintapaine voidaan laskea kaavalla

$$q_c = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

missä	q_c	on tiivistepintojen välinen pintapaine [MPa],
	F_N	normaalivoima [N], ja
	A	tiivistepinnan pinta-ala [mm ²].

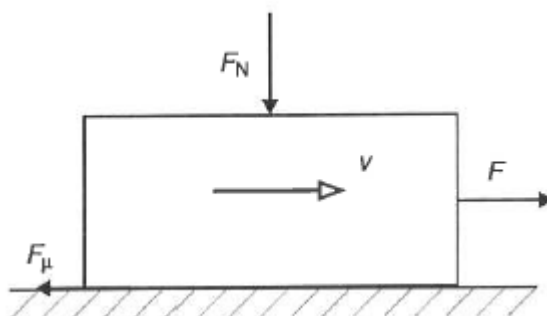
Venttiilissä normaalivoima F_N muodostuu putkistovirtauksen paine-eron aiheuttamasta puristavasta voimasta tiivistepintojen välillä. Todellisuudessa putkistovirtauksen paine vaihtelee, mutta venttiilin suunnittelussa putkistovirtauksen paine-erona käytetään sen maksimi paineenkestoa. Usein käytännön tarkoituksiin riittää tasaisella pintapaineella suoritettu tarkastelu. [14]

Pinnoitusta tiivistepinnoilla käytetään lisäämään materiaalin kulumiskestävyyttä. Pinnoite muodostaa kovan liukumista kestävän pinnan suojaamaan perusmateriaalia. [15] Sulkuelimen ja tiivisteiden geometria vaikuttaa kontaktipinnan muotoon ja myös suuruuteen. Läppäventtiileissä läpän ja tiivisterenkaan välillä on viivakosketus. Palloventtiilissä pallon ja tiivisteiden välillä kontaktipinta on laajempi ja tasaisempi, mikä takaa paremman tiiviyn. [6] Tiivistepintojen valmistusmenetelmästä riippuen pinnalle on tyy-

pillistä aaltomainen ja karhea pinta. Tavallisesti pinnankarheuden suurena käytetään profiilin keskipoikkeamaa, R_a , tai maksimiprofiilinsyvyyttä, R_z . Tiivistepinnan vähäinen pinnankarheuden vaihtelu mahdollistaa tasaisemman kontaktipinnan ja täten suuremman tiivistepinnan pinta-alan. Tiivistepintojen välisellä kuormituksella ja pinnankarheudella on vaikutusta kitkaan ja siten myös venttiilin operoinnista aiheutuvaan kulumiseen. Pintojen kosketuksessa pinnankarheuden ulokkeet kantavat kuorman, jolloin osa pinnankarheuden huipuista muokkautuu plastisesti ja osa elastisesti. Tällä on suuri merkitystä kitkaan ja kulumiseen liukuvassa kosketuksessa. [15]

4.2 Liukuva kosketus

Venttiiliä operoitaessa tiivistepinnat ovat liukuvassa kosketuksessa [16]. Näiden toisiinsa vasten liukuvien pintojen välissä vaikuttaa liikettä vastustava kitkavoima. Pintojen välisen liikenopeuden v mahdollistamiseksi kitkavoiman F_μ voittamiseksi tarvitaan ulkoinen voima F kuten kuvassa 6. Kitkaa kuvataan kitkakertoimella μ , jota käytetään eri materiaalien keskinäisen kitkan vertailemiseksi. Kitka voidaan erottaa lepokitkaan ja liikekitkaan. Lepokitka vaikuttaa liikkeelle lähdössä ja liikekitka liukumistilanteessa. Liukuvassa kosketuksessa ulkoisen voiman aiheuttaman pintojen siirtymisen tarvittava energia ei palaudu, vaan se muuttuu lämmöksi tai muodonmuutokseksi. [15]



Kuva 6. Kappaleiden välillä vaikuttavien voimien suunnat liukuvassa kosketuksessa. [15]

Liukuvassa kosketuksessa olevat kitkan haitat - energiahäviöt ja kulumisen - pyritään minimoimaan. Kitkakertoimen arvoon voidaan vaikuttaa materiaaliparin valinnalla, pinnoitteilla tai käyttämällä voiteluaineita. Tiivistepintojen välillä todellinen kosketuspinta-ala on vain osa näennäisestä pinta-alasta, mikä kasvaa normaalivoiman F_N kasvaessa. Käytännössä liukuvassa kosketuksessa kahta pintaa puristettaessa vastakkain syntyy joidenkin pinnankarheuden huippujen välillä hetkellisiä yhteentarttumisiksi eli adhe-

siivisiä liitoksia, joiden irti repeytymisen tarvittava voima muodostaa osan kitkavoimasta. Toisaalta pinnan karheuden ulokkeet saattavat muokata toisiaan ilman liitoksia, jolloin kovemman pinnan uloke kyntää pehmeämpää pintaa, mistä muodostuu kitkavoiman kyntötermi. Liukuvassa kosketuksessa kokonaiskitkavoima on adheesiokitkan ja kyntämisestä aiheutuvan kitkan summa. Kitkasta johtuva energian kulumisen aiheutuu plastisesta muodonmuutoksesta, elastisen muodonmuutoksen hystereesistä ja uusien murtopintojen muodostumisenergiasta. [15]

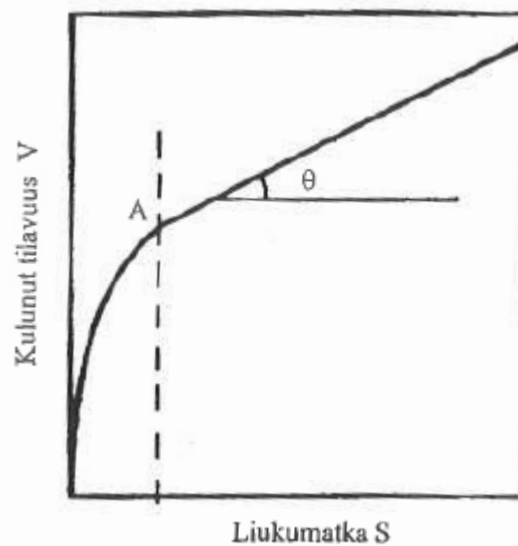
Liukuvassa kosketuksessa pintojen välisten adhesiivisten liitosten kosketuspinta-ala kasvaa kunnes liitos repeää. Yleisissä tapauksissa metallipintojen välillä lepokitka on liikekitkaa suurempi ja kitkakerroin pienenee liukumisnopeuden kasvaessa. Kuitenkin tavanomaisilla liukumisnopeuksilla kitkan pieneneminen on kuitenkin vähäistä. Kitkakertoimen vaihtelu alhaisilla nopeuksilla voi aiheuttaa tihkomisvärähtelyjä, kun kosketuspintojen lämpötila nousee huomattavasti aiheuttaen ulokkeiden paikallista sulamista. Tihkomisvärähtelyn aiheuttamaa liukupintojen haitallista kulumista voidaan vähentää pienentämällä kitkaa käyttämällä voitelua tai vierintäelimiiä. Myös konstruktion jäykkyyttä lisäämällä saadaan värähtelyn amplitudi pienenemään. [15]

4.3 Kuluminen

Venttiilin operoinnissa muodostuu tiivistepintojen välistä kulumista, mikä aiheuttaa muutoksia tiivistepinnan muodoissa ja osien mitoissa. Kuluminen on seurausta toisiaan vasten liikkuvien pintojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta ja se ilmenee materiaalihäviönä kappaleen pinnalta. Kuluminen ei ole aina haitallista, koska pinnankarheuksien tasoittuessa kontaktipinta-ala kasvaa. Tiivistepintojen liukuessa toisiaan vasten ensimmäistä kertaa niiden kosketuskohtien läheisyydessä on materiaalia, joiden poistumisen jälkeen pinnat sopivat toisiinsa paremmin. Liukuvassa kosketuksessa kulumismekanismit ovat

- adheesio,
- abraasio,
- pinnan väsyminen,
- ja tribokemiallinen kuluminen. [16]

Kulumista mitataan suhteellisenä arvona, jolloin kulunut materiaalitylisyys V suhteutetaan liukumismatkaan S kuvan 7 tapaan. Kuvasta 7 voidaan selvittää kulumisen tyypilliset vaiheet. Liukumisliikkeen alussa eli sisäänajovaiheessa kosketuspintojen kuluminen on voimakasta ja kulumiskäyrä nousee jyrkästi, kunnes pisteessä A pinnankarheet ovat tasoittuneet ja kulumisen epäpuhtaudet poistuneet kosketuspinnasta. Sisäänajovaiheen jälkeen saavutetaan kulumisen tasapainotila, missä materiaalityhukan muodostuminen muuttuu tasaiseksi liukumismatkan suhteen. Kulumisen absoluuttinen suuruus ilmaistaan yleensä kulumisnopeutena θ , jolla tarkoitetaan kuluneen tilavuuden suhdetta käytettyyn liukumismatkaan. [15]



Kuva 7. Materiaalin kulumistilavuus (V) on esitetty liukumismatkan (S) funktiona, joiden suhteella kuvataan kulumisnopeutta (θ). Pisteessä A kuluminen muuttuu sisäänajokulumisesta tasaiseksi kulumiseksi. [15]

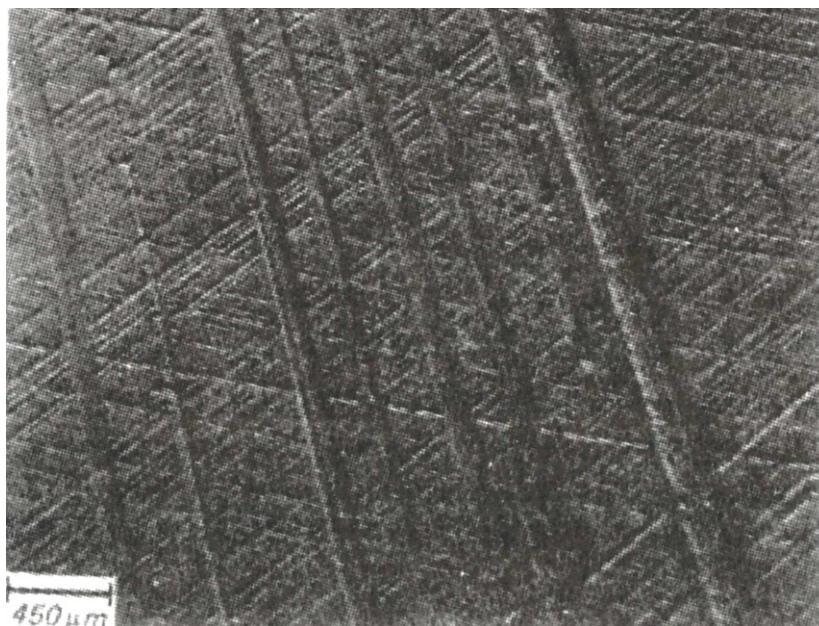
Kuluminen tiivistepinnasta voi tapahtua useammilla kulumismekanismeilla yhtäaikaaisesti, jolloin on vaikeaa erottaa vallitsevaa kulumismekanismia. Adhesiivista kulumista syntyy pintojen adhesiivisten liitosten leikkautumisena. Adhesiivisen liitoksen revetessä kulumisnopeus riippuu liitoskohdan sijainnista. Kulumispartikkeleja ei muodostu, mikäli liitos repeää alkuperäisestä pintojen rajapinnasta. Liitoksen revetessä muualta siirtyy materiaalia pinnalta toiselle ja muodostuu myös irtonaisia kulumispartikkeleita. Adhesiivisessa kulumisessa kuorman kasvaessa tai helposti leikkautuvien pintakalvojen puuttuessa pinnankarheuden ulokkeiden alla olevat plastisoituneet alueet laajenevat ja yhtyvät toisiinsa. Tällöin muodostuu niin sanottu pintojen kiinnileikkaantuminen, missä ne tahmautuvat toisiinsa koko pintakerroksen plastisoituessa. Pinnan kiinnileikkaantumisen

jälki näkyy kuvassa 8 suomumaisina ulokkeina ja kuoppina. Kulumistuotteena muodostuu myös metallilastuja ja metallin siirtymistä pinnasta toiseen. [15]



Kuva 8. Mikroskoopilla otetussa kuvassa on liukuvassa kosketuksessa tapahtuneen kiinnileikkaantumisen jättämä jälki metallipinnalla 15000-kertaisena suurennoksena kuvattuna [15].

Yleisimmässä kulumismekanismissa, abrasiivisessa kulumisessa, kovemman pinnan liukuessa pehmeämpää vasten uurtavat kovemman materiaalin pinnankarheuden huiput kuormituksen vaikutuksesta pehmeämpää pintaa. Usein abrasiivinen kuluminen alkaa kahden vuorovaikuttavan kappaleen kulumisena kehittyen kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi, kun pintojen väliin muodostuu irtonaisia muokkauslujittuneita kulumispartikkeleita. Abrasiivinen kuluminen voi tapahtua kolmella mekanismilla: kyntämällä, leikkaamalla tai hauraasti murtumalla. Kyntämällä tapahtuva materiaalin kuluminen on esitetty kuvassa 9, jossa metallin pinnassa on kyntämisestä syntyneitä naarmuja ja uurteita. Näiden lisäksi kulumistuotteena voi muodostua lastuja tai hauraasti irronneita partikkeleita. Abrasiivin terävyys ja kovemman pinnan ulokkeiden jyrkkyys vaikuttavat siihen, muodostuvatko kulumisnaarmut pehmeään pintaan leikkaantumalla vai kyntämällä. Pinnankarheuden huippujen jyrkkyys ollessa suuri leikkaantuminen on voimakkaampaa ja pienten jyrkkyysien tapauksessa plastinen muodonmuutos lisääntyy kyntämisen ollessa todennäköisempää. Huonosti sitkeistä materiaaleista kulumispartikkelit irtoavat hauraasti murtumalla, kun kuluvaan pintaan kohdistuu iskumaista kuormitusta ja materiaali on haurautensa lisäksi jäykkää. [15]

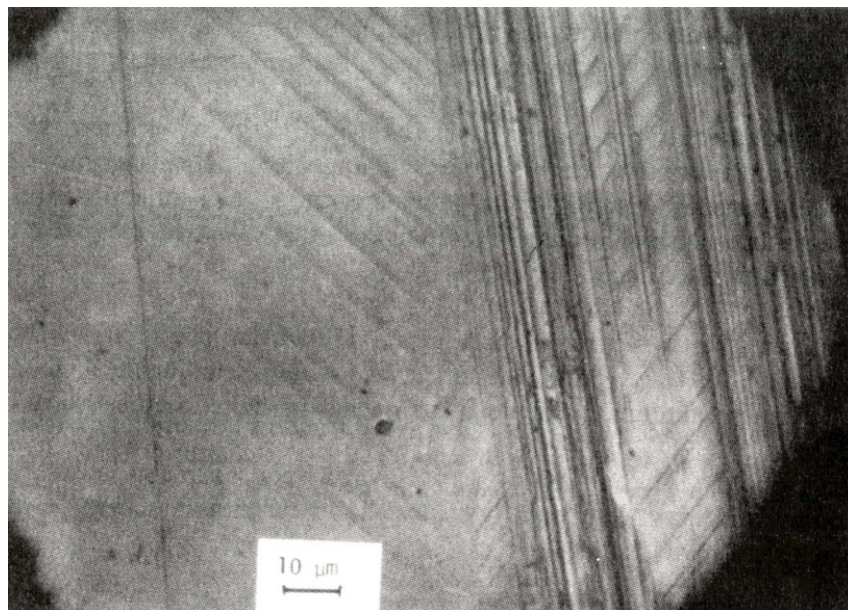


Kuva 9. Mikroskoopilla otetussa kuvassa on kyntämällä muodostuneen abrasiivisen kulumisen jättämiä naarmuja metallipinnalla 30-kertaisena suurennoksena kuvattuna [15].

Metallien pinnan päällimmäisenä kerroksena on normaalisti oksidikerros, joka pienentää materiaalin kulumisnopeutta ja kitkaa. Tribokemiallinen kulumisen on metallipintojen oksidikerroksen kulumista liukuvassa kosketuksessa. Kulumisessa oksidikerroksen rikkoutuessa paljastunut metallipinta reagoi ympäristönsä kanssa. Tribokemiallisen kulumisen muodostumiseen vaikuttaa pinnan reagointi ympäristön kanssa eli materiaalin herkkyys korroosiolle. Myös eräs tribokemiallisen kulumisen tyyppi on värähtelykuluminen, jossa toisiaan koskettavien pintojen pieniamplitudinen (0,1-1,0 mm) liike synnyttää kulumispartikkeleita adhesiivisten liitosten repeillessä liikkeen vaikutuksesta. Kulumistuotteena muodostuneet metallioksidit jättävät metallin pinnalle kemiallista reaktiotuotetta hiukkasia ja kalvoja, jotka tekevät pinnasta kiiltävän ja tiiviin näköisen. [15]

Kulumispartikkeleiden synty voi vaatia myös pitempiaikaista tykyttävää tai vaihtuvaa rasitusta. Pinnankarheuden ulokkeen muokkaantuessa plastisesti tarpeeksi monta kertaa irtoaa siitä kulumispartikkeli väsymismurtuman seurauksena. Väsymismurtuma syntyy murtumasäröstä, jonka läheisyyteen muodostuu jännityskenttä toistuvan rasituksen seurauksena. Jännityskenttä edistää murtumaa, josta vaihteleva kuormitus lopulta aikaansaa partikkelin irtoamisen. Väsymiskulumisessa pinnasta irtoaa voimakkaasti muokkautunutta kiiltävää metallihilsettä. Pintageometria muuttuu plastisen muodonmuutoksen vuoksi aiheuttaen aaltomaista kulumisjälkeä kuten kuvassa 10. Tällainen kuluminen on

mahdollista varsinkin hitaasti liukuville pinnoille, jolloin vaikutuspinnan lämpötila ei kohoja korkeaksi. [15]



Kuva 10. Mikroskoopilla otetussa kuvassa on esitetty 800-kertaisena suurennoksena väsymiskulumisesta aiheutuneen plastisen venymän aikaansaama metallipinnan muuttuminen ennen kulumispartikkelin syntymistä [15].

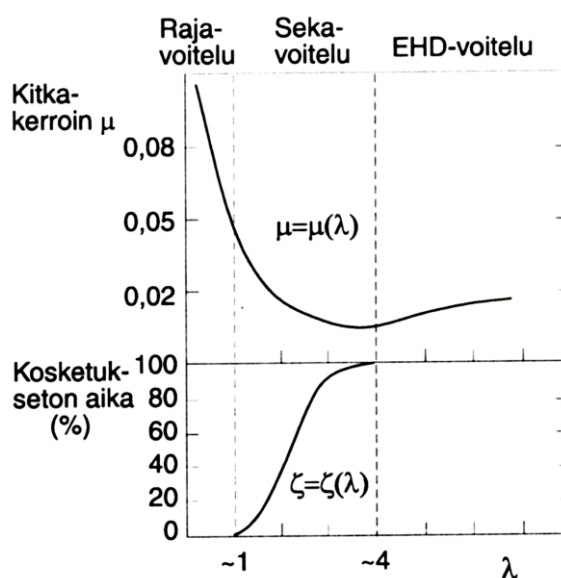
Tunnistamalla vallitseva kulumismekanismi voidaan valita paras mahdollinen materiaa-
lia tai pintakäsittelymenetelmä kuluttavaan ympäristöön. Kulumismekanismeja voidaan
arvioida silmämääräisellä tarkastelulla, mutta usein kulumismekanismin selvittäminen
vaatii pintojen tarkempaa analysointia ja kulumisympäristön tutkimusta esimerkiksi
kulumishiukkasanalyysien avulla. [15]

4.4 Voitelu

Voitelun tarkoituksena on vähentää toisiaan vasten liikkuvien pintojen kulumista ja nii-
den välistä kitkaa. Venttiilin kokoonpanon yhteydessä tiivistepinnat voidellaan kiinteitä
voiteluainerasvoja tai kuivavoiteluun tarkoitettuja liukulakkoja käyttämällä riippuen sen
käyttötarkoituksesta. Venttiilin operoinnissa voiteluaineena toimii tiivistepintojen välis-
sä myös putkistovirtauksen väliaine. Voiteluaine tiivistepinnoilla estää osittain tai ko-
konaan pintojen väliset kosketukset joko itse tai muodostamalla kosketuspintoihin niitä
suojaavan kalvon. [16]

Liukuvassa kosketuksessa tiivistepintojen välissä voitelukalvon muodostumista säätelevät voiteluaineen reologiset ominaisuudet: paineen ja viskositeetin vaikutus voiteluaineen koostumukseen. Voiteluaineen leikkautumiseen tarvittavan jännityksen ja molekyylikerrosten liukumisnopeuden suhdetta kuvataan viskositeetilla, joka on keskeinen ominaisuus voitelukalvon muodostumisessa. Yleisesti voiteluaineeksi käy mikä tahansa juokseva materiaali olomuodosta huolimatta. Nesteistä yleisemmin käytetty on öljy sen hyvistä viskositeettiominaisuuksista johtuen. Vettä voidaan käyttää myös voiteluaineena, mutta sen korroosiota edistävä vaikutus ja heikko lämmönkesto rajaavat käyttömahdollisuuksia. Kaasuista yleisin on ilma ja kiinteistä rasvat. [15]

Voitelumekanismeista nestevoitelu on edullisin kitkan ja kulumisen kannalta, jossa liikkuvat pinnat erotetaan toisistaan kokonaan voitelukalvolla. Rajavoitelussa eli kosketusvoitelussa pinnat ovat toisiaan vasten hankaavassa liikkeessä. Käytännössä useissa tilanteissa kuorma välittyy pinnasta toiseen osittain voiteluaineen kautta, mutta myös pintojen välisen kosketuksen avulla. Tätä tilannetta kutsutaan sekavoiteluksi. Liukuvassa kosketuksessa pintojen välinen kitkakerroin on riippuvainen vallitsevasta voitelualueesta ja sen tyypillisestä voitelukalvon ominaispaksuudesta λ , kuvan 11 mukaisesti. [15]



Kuva 11. Kuvaajassa on esitetty kuvitteellinen tapaus kitkakertoimen muutoksesta voitelualueen suhteen. Raja- ja sekavoitelualueiden lisäksi elastohydrodynaaminen voitelu (EHD) on eräs nestevoitelualueiden mekanismeista. [15]

Elastohydrodynaaminen voitelu eli EHD-voitelu on nestevoitelun mekanismi, jota käytetään muun muassa vierintälaakereissa. EHD-voitelua esiintyy useimmiten viivamaisissa ja pistemäisissä pintojen kosketuksissa suurilla kuormituksilla. EHD-voitelussa

muodostuu pinnat täysin toisistaan erottava voitelukalvo liikkuvien pintojen muodon, suhteellisen liikkeen, kuormituksen ja pintojen kimmoisten ominaisuuksien sekä voiteluaineen kosketuskohdassa hetkellisen kasvavan viskositeetin yhteisvaikutuksesta. [15]

4.5 Materiaalien tribologiset ominaisuudet

Venttiilin suorituskkyky on parantunut materiaalikehityksen ansiosta. Materiaalien uudet pinnoitus- ja viimeistelymenetelmät haitallisen kulumisen torjumiseksi ovat lisänneet venttiilin sovellusalueita teollisuudessa. Materiaalien kulumiskestävyys kasvaa sen kovuuden lisääntyessä kulumismekanismista riippumatta. Keraamisia materiaaleja käytetään muun muassa palloventtiilin suljinelimissä sen korkean kovuuden johdosta suuriin kuormitukseen joutuvissa tiivistepintojen kosketuksissa. Keraamien etuna on myös hyvä lämmönkestävyys, korroosionkesto ja liukuvassa kosketuksessa pieni kitka. Toisaalta keraamien haittana on niiden hauraus metalliin verrattuna, mikä johtaa helposti tuotteen rikkoutumiseen tai kulumiseen haurasmurtumien kautta. [9]

Metallien kulumiskestävyyttä tarkastellaan usein olosuhteissa, jossa abrasiivisella kulumisella on merkittävä osuus. Teräksen kulumiskestävyys on metalleista vain keskinertainen, mutta siitä huolimatta sitä käytetään hyvin usein materiaalia kuluttavissa olosuhteissa. Tämä johtuu teräksen muista hyvistä ominaisuuksista - lujuudesta, sitkeydestä, hitsattavuudesta ja hinnasta - joiden ansiosta se on yleisin käytetty venttiilin osien rakennemateriaali. Valuraudat ovat puolestaan hyviä työstää, mainioita kulutuskestoltaan ja erinomaisia lujuusominaisuuksiltaan. Kuitenkaan niiden korroosion kestävyys ei ole niin hyvä kuin teräksellä. Metallien pintakäsittelyllä - karkaisulla ja nitrauksella - parannetaan materiaalin kulumiskestävyyttä, kun saada aikaan pinnaltaan kova ja sisustaltaan sitkeä kappale. [15]

Metallisten tiivistepintojen tribologisia ominaisuuksia voidaan parantaa pinnoittamalla rakennemateriaali. Pinnoitteet voidaan jaotella elektrolyyttiseen pinnoitukseen, termiseen ruiskutukseen, kaasufaasipinnoitukseen ja timanttipinnoitukseen. Elektrolyyttisellä pinnoituksella tehtävä kovakromaus on yleisin pinnoite, joka parantaa perusmateriaalin kulumiskestävyyttä ja liukuominaisuuksia. Kovakromipinnoitteen suojavaikutus perustuu suureen kovuuteen, hyvään mekaaniseen lujuuteen ja pieneen kitkaan liukuparina useimpien materiaalien kanssa. Kromin suojaavaa vaikutusta tehostaa sen taipumus

muodostaa tiivis ja kova oksidipinta, joka estää rakennemateriaalia kulumiselta. Termisellä ruiskutuksella tehtävät karbidipinnoitteet toteutetaan sulattamalla ja sinkoamalla pinnoitemateriaali päin perusmateriaalia. [15]

Muovilla on pieni kovuus metalliin verrattuna. Pehmeä muovinen venttiilin tiiviste yhdessä kovan metallisen suljinelimen kanssa muodostaa tiiviin tiivistepintaparin materiaalien kovuuseroista johtuen. Muovilla on myös hyvä korroosion kestävyys ja korkea värähtelynvaimennuskyky, mutta pieni lämmönkesto rajaten sen käyttömahdollisuuksia. Muovi toimii venttiilin rakenteessa merkittävänä laakerimateriaalina johtuen sen pienestä kitkakertoimesta teräkseen verrattuna. Muovilaakerien kestoikää voidaan lisätä huomattavasti voitelulla, jolla sen liiallista lämpenemistä voidaan estää. Muovilaakerin kulumisominaisuuksia voidaan parantaa metallisilla täyteaineilla. Tällöin lämmönjohtavuus kasvaa ja lämpölaajeneminen pienenee, jolloin laakeroinnin mittatoleranssit voidaan asettaa pienemmiksi. Muovien kitkaa ja kulumista voidaan myös pienentää lisäämällä seokseen muun muassa grafiittia, jolloin puhutaan liukulaakeri komposiittimateriaaleista. [15]

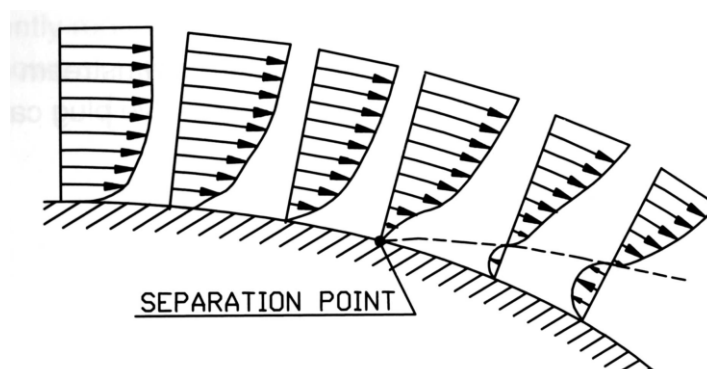
5 Sulkuventtiilin sisäinen vuotaminen

5.1 Putkistovirtauksen käyttäytyminen

Putkistossa virtaavalla aineella eli fluidilla on vaikutusta venttiilin toimintaan ja suorituskyykyyn. Venttiilin läpi kulkevat fluidit voidaan jakaa neste, kaasu ja höyry virtauksiin, joista neste on ominaisuudeltaan kokoonpuristumaton. Tämän vuoksi kaasu ja höyry virtauksissa käytetään huomattavasti pienempiä paineita nestevirtaukseen verrattuna. Putkistossa fluidi voi virrata monifaasitilassa, missä kaksi tai useampia faaseja virtaa samalla nopeudella tasaisesti sekoittuneena keskenään. Tyypillisiä prosessien monifaasivirtauksia ovat muun muassa vesihöyry ja vesi, raakaöljy ja maakaasu tai selluvirtaus. [17]

Fluidin virtaustyyppi putkistossa voi olla joko turbulenttista tai laminaarista sen virtausominaisuuksista riippuen. Laminaarisessa virtauksessa virtaavan fluidin hiukkaset etenevät tasaisesti toisiaan nähden. Hiukkaset voivat mahdollisesti liukua toistensa ohi eri nopeuksilla, mutta eivät sekoitu keskenään. Sen sijaan turbulentissa virtauksessa muodostuu pyörteitä, jolloin hiukkaset sekoittuvat keskenään. Virtaus on yleensä laminaarista, kun fluidin virtausnopeus on pieni ja viskositeetti eli virtausvastuskyky on suuri. Laminaarinen virtaus muuttuu turbulentiksi, jos virtausnopeus kasvaa tarpeeksi tai jokin putkistojärjestelmässä aiheuttaa fluidin äkillisen nopeudenmuutoksen saaden virtauksen muuttumaan epäsymmetriseksi. Putkistossa vallitseva virtaustyyppi voidaan määrittää laskennallisesti virtausominaisuuksista *Reynoldsin* luvulla. [18]

Laminaarisessa virtauksessa fluidin virtausnopeus on poikkileikkaus gradientissa likimäärin yhtä suuri, kun taas turbulenttisessa virtauksessa virtausnopeus on keskellä suurin ja putken seinämän lähellä nolla. Virtausalueen äkillisesti suureutuessa staattinen paine putken seinämässä voi nousta virtauksen suunnassa. Tämä voi aiheuttaa virtauksen joutumisen epätasapainoon ja tilanteen kehittyessä riittävän pitkän matkan hiukkasten suunta voi kääntyä taaksepäin kuten kuvassa 12. [17]



Kuva 12. Virtausalueen suurentuessa virtauksen suunta kääntyy tietyssä pisteessä [17].

Venttiilin operoinnin aikana sen kohdalla putkistossa nesteellä voi ilmetä turbulenttista virtausta. Tämä johtuu venttiilin aiheuttamasta virtauksen kuristumisesta, jolloin puhutaan niin sanotusta kavitaatio ilmiöstä. Kavitaatio syntyy virtaavassa nesteessä vallitsevista paine-eroista, jonka seurauksena neste alkaa kiehua ja muodostuneet kaasukuplat luhistuvat muodostaen jännitysiskuja venttiilin pintarakenteisiin. Jännitysiskuista muodostuva kavitaatiokuluminen saa aikaan rosoksen metallipinnan, kun metallipinnasta irtaavaa kulumispartikkeleja. Kavitaatiokulumista voi edesauttaa eroosio ilmiö. Kavitaatioeroosiossa venttiilin pintakerroksesta ainetta poistuu myös kavitaatiossa irronneiden kulumispartikkelien törmäyksestä metallipintaan. [19] Suurin venttiileitä kuluttava ilmiö on korroosio, jossa metalli tuhoutuu hapettumalla epäkuntoon reagoidessa virtauksen kanssa tapahtuvien sähkökemiallisten tai kemiallisten reaktioiden seurauksena. Materiaalin korroosion kestävyys perustuu metallin pinnalla olevaan oksidikerrokseen. Eroosiokorroosiossa fluidin korkeassa virtausnopeudessa olevat kiinteät törmäyspartikkelit pyrkivät kuluttamaan korroosiolta suojaavan oksidikerroksen metallin pinnalta ja siten kiihdyttämään korroosiota. [9]

5.2 Ideaalikaasut

Putkistossa virtaavat kaasut ovat ideaalikaasutilassa, kun kaasun ominaisuudet ovat lähellä NTP -olosuhteita. Näissä olosuhteissa kaasujen yksilölliset eroavuudet häviävät, jolloin ne noudattavat samoja ihannekaasulakeja. Useat kaasut, ilman pääainesosien tyyppien ja hapen tapaan, noudattavat ihannekaasulakeja melko tarkoin vielä paineen huoneenlämpötilassa kasvaessa normaalia ilmanpainetta nähden monenkertaiseksi. Ideaalikaasun ominaisuudet toteutuvat parhaiten sellaisilla kaasuilla, erityisesti jalokaasuilla,

joiden sulamispiste on alhainen. Ilmaa voidaan pitää tyydyttävällä tasolla ihannekaasuna. Ideaalikaasut noudattavat seuraavaa kaavaa

$$pV_k = \frac{m}{M}RT = nRT \quad (2)$$

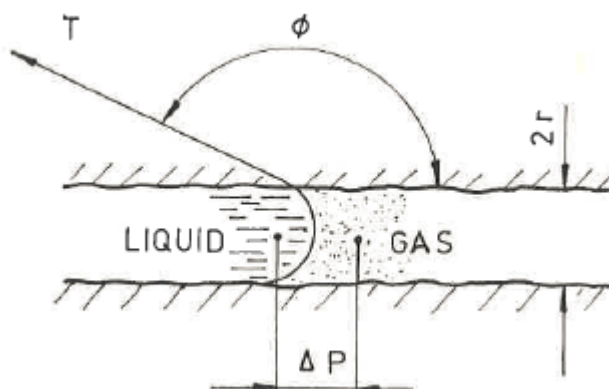
missä	p	on paine [bar],
	V_k	kaasun tilavuus [m ³],
	m	kaasun massa [kg],
	M	kaasun moolimassa [$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$],
	R	yleinen kaasuvakio [$8314,3 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$],
	T	kaasun lämpötila [K], ja
	n	kaasun ainemäärä [mol]. [20]

Yleisesti ottaen kaasujen rakenneosat molekyyalitasolla ovat erillään toisistaan ja siten vapaassa liikkeessä tasetilassa. Tyypillisesti kaasun molekyylien etäisyyksistä johtuen sen tiheys on varsin pieni. Kaasun molekyylit ovat jatkuvassa nopeassa liikkeessä ja satunnaisen liikkeen vuoksi molekyylit törmäilevät tasetilan seinämiin. Ainemäärän kasvaessa tasetilan tilavuutta kohden molekyylien keskinäisten törmäysten lukumäärä kasvaa, jolloin kaasun lämpötila nousee. Tiheyden kasvaessa tasetilan kaasun paine kasvaa, jolloin tasetilan seinämiin kohdistuu suurempi voima molekyylien törmäilystä pintaa vasten. [21]

5.3 Vuototeoriaa

Venttiilin tiiviys saadaan aikaan tiivistepintojen tarkkojen sovitteiden avulla. Tarkoista sovitteista huolimatta rakoja jää tiivistävien pintojen väliin. Nämä vuotoraot täyttyvät ympäristössä vallitsevasta kaasusta. Virtaavan fluidin ollessa nestettä pintajännityksestä muodostuva vastavoima eli kapillaarivoima estää nestettä työntymästä rakoon. Fluidin paineen ylittäessä kapillaarivoiman tiivistys alkaa vuotaa nesteen työntyessä raosta läpi. Kapillaarivoiman ylittyminen perustuu nesteen ja seinämän väliseen kontaktikulmaan φ . Sen ollessa suurempi kuin 90° kuvan 13 mukaisesti, kapillaarivoima estää nestettä vuotamasta. Vuodon tapahtuessa ja tiivistepintojen kastuessa kapillaarivoiman uudelleen

muodostuminen vaatii tiivistepintojen kuivumisen. Metallisilla pinnoilla kontaktikulmaa voidaan kasvattaa voitelun avulla. [9,22]



Kuva 13. Kuvassa on esitetty nesteen (liquid) ja kaasun (gas) välisen pintajännityksen vaikutus kontaktikulmaan (ϕ) vuotoraossa. Pintajännitys muodostaa leikkausjännityksen (τ). Lisäksi kuvassa on esitetty vuotoraon halkaisija ($2r$), ja nesteen ja kaasun välinen paine-ero (Δp). [9]

Pintojen välisestä tiivistyksestä ei saada vuotamatonta virtaavan fluidin ollessa kaasu. Kaasujen tiivistys määritellään kaasun viskositeetin sekä molekyyliseen perusteella. Vuotoraon ollessa halkaisijaltaan suuri kaasuvuodon virtaus on turbulenttista. Virtaus muuttuu laminaariseksi kaasuvuodon kulkeutuessa halkaisijaltaan pienen vuotoraon läpi, kun *Reynoldsin* luku laskee alle kriittisen rajan. Laminaarinen virtaus voi pienentää kaasun molekyylin kokoa, jonka seurauksena vuoto ei välttämättä lopu, sillä pienet kaasumolekyylit voivat alkaa läpäistä kiinteää metalliseinää. [9]

Venttiilin sisäiseen tiiviyteen vaikuttaa sekä suljinelimen ja tiivisteiden että tiivisteiden ja pesän väliin jäävät vuotoreitit. Vuotoreitteihin vaikuttavat kolme tekijää: pintojen geometria, pintoihin kohdistuva kuormitus sekä tiivistemateriaalin koostumus. Puolestaan vuotomäärään vaikuttaa virtaavan fluidin paine, lämpötila ja koostumus. Muotovirheettömällä tiivistepinnoilla vuotovirtaus on pääasiassa laminaarista. Tiivistepintojen kontaktin ollessa erittäin hyvä vuotovirtaus on erittäin vähäistä vapaata molekyylivirtausta. [22]

Tiiviit venttiilit tekevät prosessista taloudellisen, koska venttiilin sisäinen vuotaminen aiheuttaa prosessissa kustannuksia. Venttiilin sisäinen vuotaminen aiheuttaa putkistossa virtaavan fluidin menettämisen lisäksi prosessin aine-tasapainon, hyötysuhteen ja loppu-tuotteen laadun heikkenemisen. Myös sisäisen vuodon johdosta on mahdollista päästä

ympäristöön sille haitallisia aineita. Venttiilin tiiviyn elinkaarta pidentämällä huollontarpeesta, korjauksista ja varaosista aiheutuvat kustannukset vähenevät. [6]

5.4 Vuotoon vaikuttavat tekijät

Venttiilin vuotoon vaikuttavat tekijät ovat usein riippuvaisia toisistaan, jonka vuoksi niiden yksittäinen tutkiminen luotettavasti on haastavaa kokonaisilla prosessiventtiileillä. Venttiilin vuotoon vaikuttavat tekijät voidaan jakaa

- tiivistepintojen geometriaan,
- materiaalivalintoihin, ja
- ympäristö- ja kuormitusolosuhteisiin.

Tiivistepinnan geometrian virheitä ovat muun muassa pinnankarheus, aaltomaisuus, naarmut ja pintojen muotopoikkeamat, jotka muodostuvat sekä osien valmistuksessa että venttiilin operoinnissa. Tiivistepinnan geometrian virheiden vähentämiseksi pinnat viimeistellään yleensä hiertämällä eli läppäämällä toisiinsa tasaisemman kontaktin saamiseksi. Pintojen välissä hioma-aineena voidaan käyttää kovia, mutta hienoa timanttia tai karbidiseoksia. Seoksien hiomarakeiden koko on keskeisin pinnankarheuteen vaikuttava tekijä. [6]

Aikaisemmin Diplomi-insinööri Markus Hauhia tutki diplomityössään pinnankarheuden vaikutusta tiiviyteen. [22] Kokeellisesti saatujen tulosten mukaan tiivisteiden ja sulkueliimen yhteenlaskettu pinnankarheuden keskipoikkeama, R_a , vaikuttaa erittäin voimakkaasti venttiilin tiiviyteen. Tuloksissa tiivistepintojen R_a -arvon kaksinkertaistuessa vuoto kasvoi 7-8-kertaiseksi suurina kaasuväliaineen paineilla käyttäessä. Tiivistepinnan geometrian lisäksi venttiilin tiiviyteen vaikuttaa olennaisesti myös tiivistävien pintojen muotoilu ja mitoitus. Tiivistepinnan leveys vaikuttaa vuotoreitin pituuteen ja siten venttiilin vuotoon. Hauhia osoitti työssään pidemmän vuotoreitin takaavan paremman venttiilin tiiviyn. Tiivistepinnan leveydellä on vaikutusta kontaktipinta-alaan ja sitä myöden kuormitukseen tiivistepintojen välillä. Kuormittavan voiman pysyessä samana kontaktipinta-alan suurentuessa tiivistepintojen välinen pintapaine vähenee, jolla on vaikutusta venttiiliin vuotoon. Hauhia testasi kokeellisesti venttiilin kaasuvuotoa eri väliaineiden paine-eroilla tiivistepintojen välisen pintapaineen funktiona. Testissä havaittiin

vuodon pienenevän jyrkästi pintapaineen kasvaessa. Vuoto pieneni vakioksi tiivistepintojen pintapaineen kasvaessa tiettyyn pisteeseen. [22]

Tiivistepinnat pinnoitetaan erikoismateriaaleilla operointikestävyyden parantamiseksi. Pinnoitemateriaalit kestävät kulutusta liukuvassa kosketuksessa kuormituksen alaisena paremmin kuin rakennemateriaalit. Pinnoitteen valinnassa on kulumiskestävyyden lisäksi on otettava huomioon pinnoitemateriaalin lämpötilarajoitukset, liukumisominaisuudet, huokoisuus, korroosionkesto ja pinnoitteen tarttumislujuus. Venttiilin tiivistepinnoissa käytetään useita eri pinnoitevaihtoehtoja, mutta yleisimmät ovat kromi-, koboltiseos- ja volframikarbidipinnoitteet, joiden ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 1. Pinnoitteessa huokoisuus heikentää venttiilin tiiviyyttä, koska kaasumaiset molekyylit vuotavat niistä läpi. Toisaalta jos pinnoitteen muut ominaisuudet ovat erinomaiset, niin käytännössä huokoisuudesta aiheutuva pieni vuoto sallitaan. Pinnoitteen kovuudella, kitkakäyttäytymisellä ja lämpötilankestävyydellä ei ole suoranaista merkitystä vuotoon, mutta esimerkiksi pinnoiteparien kitkakerrointa tarvitaan kontaktianalyysissä. [6]

Taulukko 1. Yleisempien venttiilien tiivistepintojen pinnoitemateriaalien volframikarbidin -koboltin (WC-Co), kromin (Cr) ja stelliitin (Stellite 12) ominaisuudet [6].

Pinnoite	Kitkakerroin	Kovuus (HRC)	Huokoisuus	Lämpötila (°C)
WC-Co	0,2-0,8	69	1%	-200 ... +500
Cr	0,3-0,8	68-70	Mikrohalkeamia	-200 ... +450
Stellite 12	0,3-0,8	45-48	0 %	-200 ... +600

Lämpötilan ja paineen vaikutus fluidin viskositeettiin ja siten vuotomäärään on merkittävä. Virtaavan fluidin paineen kasvaessa vuotorakojen kapillaarivoimien hävitessä vuoto kasvaa. Nesteillä lämpötila vaikuttaa sen viskositeettiin, kun kaasuissa suurissa paineissa viskositeetti riippuu sekä lämpötilasta että paineesta. Kaasujen dynaaminen viskositeetti on merkittävästi pienempi kuin nesteillä johtuen olomuotojen tiheyseroista. Nesteiden ollessa kykenevämpiä vastustamaan virtausta vuotoarvot kaasuilla ovat suuremmat kuin nesteillä. [22] Lämpötilan muutokset näkyvät myös venttiilin rakenteiden muutoksissa. Sulkuelimen ja tiivisteiden lämpölaajenemisesta johtuvat muodonmuutokset vaikuttavat tiivistepintojen kontaktiin ja näin ollen venttiilin vuotoon. Lisäksi lämpötila vaikuttaa väliaineen käyttäytymiseen. Dynaaminen viskositeetti ja tiheys kehittyvät eri suuntiin lämpötilan muuttuessa. Alun perin huoneenlämpötilassa laminaarinen vuotovir-

taus voi muuttua turbulentiksi lämpötilan noustessa. Venttiilin tiiviysominaisuuksiin lämpötila vaikuttaakin erittäin merkittävästi. [23]

5.5 Hauhian vuotomalli

Venttiilien vuodosta on julkaistu monia eri teorioita, jotka pätevät eri alueilla riippuen vuotovirtauksen suuruudesta ja ympäristöolosuhteista. [6,22] Venttiilissä vuotoreitin kulkeutuessa tiivisteen ja sulkuelimen välistä, sen pituus on useimmiten suhteellisen lyhyt. Todellisuudessa vuotoreittien suuntaa ja suuruutta on vaikea mallintaa. Teoreettisten yhtälöiden on todettu antavan vain suhteellisen karkean kuvan vuodosta. Toisaalta eri teorioiden vertailu mahdollistaa kokonaiskuvan saamisen vuotoon liittyvistä tekijöistä sekä keskittymisen tärkeimpien tiiviystekijöiden tutkimiseen. V.F. Shatinskiin metallitiivisteen kaasuvuodon vuotomallin perusteella Hauhia laati oman vuotomallin opinäytetyössään tutkimalla palloventtiilin matemaattista vuodonmallinnusta. [22] Hauhian vuotomallimalli on yleistetty toimimaan erityyppisillä venttiileillä ja se on myös todennettu kokeellisilla vertailumittauksilla. Hauhian vuotomalli noudattaa kaasuvuodolle kaavaa

$$Q' = 1,4435 * 10^{-3} \frac{(\Sigma R_a)^3 * B * x^{-0,66}}{\eta * p_0 * \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)} * (p_1^2 - p_2^2) \quad (3)$$

missä	Q'	on vuotomäärä $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$,
	ΣR_a	tiivistepintojen yhteenlaskettu pinnankarheuden arvo $[\mu\text{m}]$,
	B	kanavakerroin,
	x	pintapaine projektio pinta-alalle $[\text{Pa}]$,
	η	väliaineen dynaaminen viskositeetti $\left[\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right]$,
	p_0	normaali ilmanpaine $[\text{Pa}]$,
	p_1	tulopuolen paine $[\text{Pa}]$,
	p_2	jättöpuolen paine $[\text{Pa}]$,
	r_0	tiivisteen ulkosäde $[\text{m}]$, ja
	r_1	tiivisteen sisäsäde $[\text{m}]$.

Vuotomallista saadun vuotomäärän Q' virhemarginaaliksi on arvioitu $\pm 50\%$. Suuresta virhehaarukasta johtuen vuotomallista saadut vuotoarvot ovat suuntalinjoja antavia. [6]

5.6 Vuotostandardit

Venttiileille sallitut vuotomäärät on määritetty kansainvälisissä vuotostandardeissa. Yleisimmät vuotostandardit venttiilin sisäiselle tiiviydelle ovat ANSI/FCI 70-2, DIN 3230 ja ISO 5208, joiden valinta on riippuvainen asiakkaiden vaatimuksista. Standardeissa on määritetty venttiilin vuodonmittauksen suorittamistapa, kesto aika, testipaine, käytettävä väliaine ja sallittu vuoto. Standardien määrittelemien sallittujen vuotoarvojen mukaan venttiilit jaotellaan eri tiiviysluokkiin tiiviystestissä saadun todellisen vuodon perusteella. Yleisempien vuotostandardien sallimat vuotorajat eri tiiviysluokissa on esitetty taulukossa 2. Venttiileiden vuotoja vertailtaessa eri valmistajien välillä tiiviysluokat toimivat tärkeänä laatumittarina. Vuotostandardit määrittelevät venttiilin tiiviiden ainoastaan testihetkellä venttiilin valmistuksen jälkeen, eikä sen avulla voida määrittää venttiilin tiiviyttä varsinaisessa käytössä putkistossa. [24]

Taulukko 2. Standardien - ANSI/FCI 70-2, DIN 3230 ja ISO 5208 - sallimat vuotorajat (ml/min) väliaineilman vuotovirrälle eri tiiviysluokkien välillä venttiilin virtausaukon halkaisijan suhteen [25].

DN mm	NPS tuuma	ISO 5208 BS 6755 Part 1				DIN 3230 Part 3			ANSI / FCI 70-2 IEC 534-4 class VI (3-4 bar)	MSS SP-72 metallitiiv. (1992)	API 6D kaikki ja api 598 pehmeätiiv.	API 598 metalli- tiivisteiset
		Rate A	Rate B	Rate C	Rate D	Rate 1	Rate 2	Rate 3				
25	01	0	0.45	4.5	45	0	0.60	25	0.15	200	200	0
40	015	0	0.72	7.2	72	0	0.60	25	0.30	300	300	0
50	02	0	0.90	9.0	90	0	1.80	63	0.45	400	400	0
65	025	0	1.17	11.7	117	0	1.80	63	0.60	500	500	4.5
80	03	0	1.44	14.4	144	0	1.80	63	0.90	600	600	4.5
100	04	0	1.80	18.0	180	0	1.80	63	1.70	800	800	4.5
125	05	0	2.25	22.5	225	0	2.70	94	-	1000	1000	4.5
150	06	0	2.70	27.0	270	0	2.70	94	4.00	1200	1200	4.5
200	08	0	3.60	36.0	360	0	3.60	125	6.75	1600	1600	7.5
250	10	0	4.50	45.0	450	0	4.50	157	11.10	2000	2000	7.5
300	12	0	5.40	54.0	540	0	5.40	188	16.00	2400	2400	7.5
350	14	0	6.30	63.0	630	0	6.30	220	21.60	2800	2800	10.5
400	16	0	7.20	72.0	720	0	7.20	252	28.40	3200	3200	10.5
450	18	0	8.10	81.0	810	0	8.10	314	-	3600	3600	10.5
500	20	0	9.00	90.0	900	0	9.00	314	-	4000	4000	10.5
600	24	0	10.80	108.0	1080	0.3	10.80	376	-	4800	4800	10.5
700	28	0	12.60	126.0	1260	0.3	12.60	440	-	5600	5600	10.5
750	30	0	13.50	135.0	1350	0.3	13.50	502	-	6000	6000	10.5
800	32	0	14.40	144.0	1440	0.3	14.40	502	-	6400	6400	10.5
900	36	0	16.20	162.0	1620	0.3	16.20	565	-	7200	7200	10.5
1000	40	0	18.00	180.0	1800	0.3	18.00	628	-	8000	8000	10.5
1200	48	0	21.60	216.0	2160	0.6	21.60	752	-	9600	9600	10.5
1400	56	0	25.20	252.0	2520	-	-	-	-	11200	11200	10.5

6 Vuodonmittaaminen

6.1 Venttiilin vuodon mittausmenetelmät

Venttiileiltä vaaditaan asiakkaan määrittämää riittävää tiiviyttä. Venttiilin tiiviyys testataan normaalisti paineistetulla huoneenlämpöisellä vedellä, ilmalla tai inertillä kaasulla. Vesitiiviytestissä vuotoarvo ilmoitetaan tilavuutena tai vesipisaroina ajan suhteen [ml/min]. Kaasutiiviytestissä kaasuvuoto johdetaan veden tai muun kuplia muodostavan aineksen läpi ilmoittaen vuotomäärä kaasukuplina ajan suhteen. Pieniä kaasuvuotoja voidaan mitata haistelumenetelmällä, jossa esimerkiksi heliumin vuotoa mitataan atomitasolla. Tiiviytestistä saadun venttiilin todellista vuotoarvoa verrataan vuotostandardiin, jonka perusteella venttiilin tiiviytsluokka voidaan määrittää. Venttiilin kokoonpanon jälkeen sen tiiviytesti tehdään koeponnistuksen yhteydessä lopputarkastuksessa tilauksesta määrättyjen standardien mukaisesti. [9,26]

Venttiilin sisäisen tiiviyden testi tehdään sulkuelimen ollessa kiinni asennossa. Halutun testipaineen alaisena väliaine johdetaan venttiilin tulopuolen virtausaukkoon, jolloin mahdollinen vuoto mitataan jättöpuolelta koeponnistusumpilaipan lävitse. Tiiviytesti tehdään molemmille venttiilin tiivisteille. Vakiotestipaine ilmalla on 6 bar ja vedellä normaalisti välillä 10–57 bar. Tiiviytestissä voidaan käyttää vuotovirran suuruuden mittarina rotametria tai mittalasia. Vuotovirran ollessa vähäistä voidaan sen tilavuus ajan suhteen laskea tippoina tai kuplina. Vuotostandardit määrittelevät tippojen ja kuplien määrät ja niiden tilavuudet sekä vuotoputken halkaisijan ja sen upottamissyvyyden veteen. Testipaineen tulee vaikuttaa kussakin tiiviytestissä vähintään vuotostandardin mukaisen ajan, ja mittaus testin pitoajalle aloitetaan vasta, kun pysyvät olosuhteet on saavutettu. [26]

6.2 Muut vuodon mittausmenetelmät

Vuotoa etsitään ja mitataan myös muissa teollisesti valmistettavissa tuotteissa. Viallinen tiiviste tai naarmu tiivistepinnassa on mahdollinen ongelma laitteen tiiviyden menettämiseen. Edellä mainittujen vuodon mittausmenetelmien lisäksi vuotoa etsitään visuaalisesti tai esimerkiksi yksinkertaisella kuplataustauksella, jossa tutkittava kappale laitetaan veteen tai muuhun nesteeseen. Kappaleen ollessa nesteessä tarkkaillaan mahdollisia

vuodosta muodostuvia kuplia. Vuodon mittaamenetelmät voidaan jakaa yli- tai alipaineellisiin menetelmiin. Tyhjiötestausmenetelmässä tutkittavaan kappaleeseen pumpataan tyhjiö, minkä jälkeen kappaleen ulkopinnalle suihkutetaan vuodonilmaisuainetta. Mahdollinen vuoto havaitaan tyhjiön yhteydessä olevalla vuodonetsimellä. Pommitusmenetelmässä kappale suljetaan useiden tuntien ajaksi kammioon, jossa heliumia on monenkertaisesti ilmakehän paineeseen verrattuna. Sen jälkeen helium poistetaan ja kammioon pumpataan tyhjiö ja seurataan purkautuuko kappaleesta tyhjiö. Lisäksi vuodonmittaus voidaan suorittaa seuraamalla kappaleen painetilassa vallitsevan väliaineen paineen kehitystä. Tällöin puhutaan paine-eromittauksesta, jonka suurena hyötynä on että vuotoa ei tarvitse kerätä talteen. Kuitenkin menetelmä vaatii suurempia investointeja laitteistoon. Paineita voidaan mitata esimerkiksi painelähettimillä, painemittareilla ja nestepatsaslaitteistoilla. [27,28]

Paine-eromenetelmällä mitattaessa havainnollisen ja luotettavan tuloksen saamiseksi vuoto tulee muuttaa paineen muutoksesta ainemäärään muutokseksi ajan suhteen. Vuodon määrittämiseen paine-eromittauksella on edullista hyödyntää ideaalikaasutilanyhtälö, jonka seurauksena mittaukseen käytettävän väliaineen tulee olla ihannekaasu. Paine-eromittauksessa paineen p ohella mitattavana muuttuvana tekijänä on kaasun lämpötila T . Mittauksessa vakioarvoina ovat kaasun tilavuus V_k , kaasun moolimassa M ja yleinen kaasuvakio R . Ideaalikaasutilanyhtälön mukaan edellä olevista tekijöistä voidaan ratkaista kaasun massa m , kaavaa 2 käyttäen. Vuoto määritetään massan muutoksena ajan suhteen eli massavirtana seuraavalla kaavalla

$$q_m = \frac{\frac{p_a * V_k * M}{R * T_a} - \frac{p_l * V_k * M}{R * T_l}}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{p_a}{T_a} - \frac{p_l}{T_l}\right) * \frac{V_k * M}{R}}{\Delta t} \quad (4)$$

missä	q_m	on massavirta $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$,
	p_a	paine alussa [bar],
	T_a	lämpötila alussa [K],
	p_l	paine lopussa [bar],
	T_l	lämpötila lopussa [K], ja
	Δt	ajanmuutos [s].

Edelleen vuoto voidaan muuttaa massavirrasta tilavuusvirraksi havainnollisemman tuloksen saamiseksi seuraavalla kaavalla

$$q_V = \frac{q_m}{\rho} = \frac{q_m}{\frac{M \cdot p_0}{R \cdot T_{avg}}} \quad (5)$$

missä	q_v	on tilavuusvirta $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$,
	ρ	tiheys $[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$,
	p_0	normaali ilmanpaine [Pa], ja
	T_{avg}	lämpötilan keskiarvo mittauksessa [K].

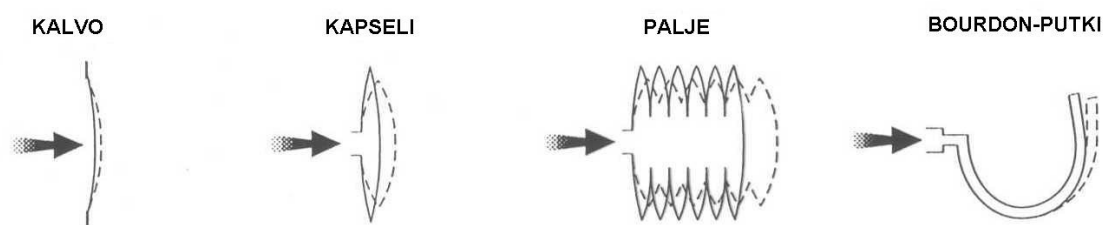
Tilavuusvirran määrittämisessä muodostuneen vuodon ympäristön paineena voidaan pitää normaalia ilmanpainetta $p_0 = 1013,25 \text{ hPa} = 1,01325 \text{ bar}$, koska painetilasta kaasuvuoto kulkeutuu ympäristöön. [29]

7 Väliaineen paineen mittaaminen

7.1 Paineen mittausmenetelmät

Paineen mittaaminen on paine-eron mittaamista sen vertailuarvoon nähden. Esimerkiksi vallitsevan ilmanpaineen vertailuarvo on tyhjiö. Paine-ero termiä käytetään, kun vertailuarvona toimii jokin muu paine kuin tyhjiö tai vallitseva ilmanpaine. Paine-eron vertailuarvoa kutsutaan linjapaineeksi. Paineen mittaamisessa primaarinormaaleina eli mittanormaaleina käytetään yleensä joko painevaakoja tai nestepatsasmanometreja. Painevaaioissa sovelletaan suoraan paineen määritelmää antamalla tunnetun voiman vaikuttaa mäntäsynteriyhdistelmän tunnetulle pinta-alalle, ja nestepatsasmanometreissa paine realisoidaan hydrostaattisen paineen avulla. Käytännössä painekalibrointiin mittanormaaliksi voidaan käyttää mitä tahansa mittausepävarmuudeltaan riittävän stabiiliksi todettua painemittaria. [28]

Muut kuin painevaaka-tyyppiset paineen mittauslaitteet käyttävät yleensä hyväksi elastista muodonmuutosta, joka muodostuu paineen vaikutuksesta mittarin tuntopäähän. Kuvassa 14 olevissa mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvissa paineen mittausmenetelmissä paineen vaikuttaessa laitteen tuntopää liikkuu. Toimivan mittauslaitteen tuntopään liikkeen eli muodonmuutoksen on oltava riittävän pieni, jotta se pysyy materiaalin ominaisuuksien puitteissa elastisella alueella. Kuitenkin tuntopään liikkeen on oltava riittävän suuri sen havaitsemiseksi tarvittavalla tasolla. Matalien paineiden mittaamiseen tarkoitetuissa laitteissa käytetään tuntopäässä ohuita ja joustavia komponentteja. Puolestaan suuria paineita mitattaessa tarvitaan paksumpia ja jäykempiä komponentteja. [28]



Kuva 14. Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvat paineen mittausmenetelmät. Paineen aiheuttama mekaaninen muodonmuutos tapahtuu painemittauslaitteiston tuntopäässä liikkeenä. Tuntopääkomponentteina voidaan käyttää kalvoa, kapselia, paljetta tai Bourdon-putkea. [28]

Mittauslaitteen tyypistä riippuen mekaanisen muodonmuutoksen havaitsemiseksi on käytössä useita erilaisia tekniikoita. Paineen aiheuttaman tuntopään siirtymän muuntaminen paineeksi voidaan suorittaa mekaanisen tai sähköisen vahvistuksen käytöllä, tai hyödyntämällä vastuksen, kapasitanssin ja värähtelytaajuuden riippuvuutta muodonmuutokseen. Erittäin pienillä paineen mittaalueilla tuntopään muodonmuutoksien ollessa liian pieniä mitattavaksi käytetään kaasujen ominaisuuksiin perustuvia epäsuoria menetelmiä. [28]

7.2 Paineen mittauslaitteen kalibrointi

Paineen mittauslaitteen kalibroinnilla määritetään sen näyttämän ja mittanormaalien välinen yhteys, jonka perusteella selvitetään laitteen käyttökunto. Esimerkiksi painelähettimen kalibroinnissa määritetään syötetyn paineen ja ulostulosignaalin välinen ero mittaus tuloksissa. Kalibroinnin tavoitteena on saada selville laitteen näyttämään liittyvä virhe suoraan ulostulosignaalin perusteella, josta määritetään mittauslaitteen näyttämiin käytön aikana tehtävien korjausten suuruudet ja mahdollisen virityksen tarpeellisuus. Paine mittarin virhe määritellään näyttämän paineen ja mittanormaalien paineen erotuksena. [28]

Kalibroinnista saatujen mittaus tulosten perusteella mittauslaite voidaan halutessa virit tää. Viritys on erillinen toimenpide kalibroinnista ja se edellyttää yleensä mittauslaitteen uudelleenkalibrointia. Kalibroinnin toteuttamiseksi kalibroitava mittauslaite ja vertailu arvona toimiva mittanormaali kytketään samaan paineverkkoon. Kalibroinnissa kalibroitavan laitteen näyttämää verrataan mittanormaalien näyttämään erisuuruuksilla nimel lispaineilla. Paineen mittauslaitteen kenttäkalibroinneissa käytetään mittanormaaleina eli kalibraattoreina yleensä elektronisia laitteita, joissa paineen mittauksen lisäksi on tiedonkeruun tallennusominaisuus. Kalibraattorien kalibrointi suoritetaan yleensä laboratorio-oloissa käyttäen mittanormaaleina painevaakoja. [28]

Kalibroinnin olennainen osa on laitteen mittausepävarmuuden laskeminen, mikä tulee ilmoittaa mittaus tulosten yhteydessä. Laitteen mittausepävarmuudella kuvataan mittaus tulosten luotettavuutta. Keskeisimmät mittauslaitteen kalibroinnin epävarmuuteen vaikuttavat tekijät ovat mittaus tulosten hajonta, mittauslaitteen erottelukyky, mittanormaalien epävarmuus ja hystereesi. Mittauslaitteen kalibrointitulokset esitetään yleensä kalibroin-

titodistuksessa, minkä esitystapa voi vaihdella. Kalibrointitulos voi sisältää pelkästään mittauslaitteen yksittäisiä näyttämiä vastaavat virheet tai korjaukset. Kalibrointitulos voidaan esittää myös laskentakaavana eli sovitussyhtälönä, josta mittauslaitteen näyttämä muunnetaan oikeaksi. [28]

7.3 Paineen mittauslaitteen valinta

Paineen mittauslaitteen valintaan tulee kiinnittää huomiota halutun mittausepävarmuuden saavuttamiseksi, jotta saadaan luotettavia mittaustuloksia ja tehdään tarkoituksenmukaisia mittauksia. Paineen mittauslaitteen valinnassa oleellista ei ole pyrkiä mahdollisimman pieneen epävarmuuteen vaan mittaustilanteesta riippuvaan tarvittavaan tasoon. Mittauksista aiheutuvien kustannusten ja tulosten luotettavuustason välillä pyritään tekemään hallittuja kompromisseja. Mitä pienempään mittausepävarmuuteen pyritään, sitä enemmän resursseja mittauslaitteiden kalibroinnit, stabiiliusseurannat ja huollot vaativat. Toisaalta kohtuuttoman suuri epävarmuustaso kasvattaa kustannuksia epäluotettavista mittaustuloksista tehtyjen väärin johtopäätöksiensä kautta. [28]

Mittauslaitteen mittausalue tulee valita mahdollisimman tarkasti mitattavaan tilanteeseen. Mittauslaitteen erottelukyky on parhaimmillaan mittausalueensa keskivaiheilla ja se voi heiketä dramaattisestikin alueen ääripäitä lähestyttäessä. Tämän seurauksena mittauslaitetta ei voida hyödyntää kovin useaan erilaiseen mittauskohteeseen vaan kullekin mittausalueelle on hankittava oma mittauslaite. Mittauskohteen ympäristöolosuhteet vaikuttavat mittauslaitteen suorituskykyyn ja elinkaareen. Vaativissa käyttöolosuhteissa on selvitettävä mittauslaitteen lämpötilariippuvuus, kosteuden ja värinän sietokyky sekä mahdollisten sähköisten häiriöiden sietokyky. Kenttämittauksissa laboratoriotason mittauslaitteet eivät usein sovellu mittauslaitteen kuljettamiseen. [28]

8 Väliaineen lämpötilan mittaaminen

8.1 Lämpötila väliaineessa

Lämpötila ilmaisee kohteen termodynaamisen lämpötilan eli absoluuttisen lämpötilan. Kohde on lämmin jos siihen on vaikuttanut atomitasolla liike-energiaa, joka saa sen atomit liikkumaan. Aineen rakennehiukkasten liikkumista kutsutaan lämpöliikkeeksi. Mitä nopeammin atomit liikkuvat, sitä enemmän niihin on kertynyt liike-energiaa ja sen korkeampi on kohteen keskimääräinen lämpötila. Lämpöenergia tasot eri kappaleiden välillä pyrkivät tasoittumaan, jolloin energia siirtyy lämpimästä viileämpään. [21]

Lämpölaajeneminen tarkoittaa aineen laajenemista eli tilavuuden kasvamista lämpötilan noustessa. Aineen koon muuttumista lämpötilan suhteen kuvataan tilavuuden lämpölaajenemiskertoimella γ [1/K], joka on lähes poikkeuksetta positiivinen. Lämpölaajeneminen ei välttämättä tapahdu tasaisesti aineessa eri olosuhteissa, vaan materiaalista riippuen tietyt lämpötilavälit, materiaalin atomirakenteet ja faasimuutokset vaikuttavat lämpölaajenemiskertoimen arvoon. Lämpölaajeneminen tapahtuu myös päinvastaisesti eli lämpötilan laskiessa aine kutistuu. Aineen tilavuuden muutoksen johdosta rakenteissa voi alkaa muodostamaan mahdollisia veto- tai puristusjännityksiä riippuen tilavuuden muutoksen suunnasta. Tämän myötä systeemin kuormitusolosuhteet voivat muuttua, jotka on otettava huomioon mahdollisessa mittauksessa sekä lujuusopillisesti rakenteissa. [30]

8.2 Lämpötilan mittausmenetelmät

Väliaineen lämpötilan mittaaminen perustuu joko kosketus mittausmenetelmään tai koskemattomaan mittausmenetelmään. Kosketus mittausmenetelmässä lasi-, vastus-, termoelementti-lämpötilamittareilta edellytetään riittävän syvää upottamista mitattavaan väliaineeseen. Kiinteiden kappaleiden tapauksessa lämpötilamittarille tulee olla riittävän syvä tasku tai onkalo väliaineeseen. Pintalämpötilamittareilla väliaineen pinnalta suoritettava lämpötilan mittaaminen tuottaa yleensä huonon kosketuksen mittavaan pintaan johtaen epäluotettaviin mittaustuloksiin. Koskemattomalla mittausmenetelmällä toimivan infrapunalämpötilamittarin mittaustulokseen vaikuttavat väliaineen pinnan lämpöti-

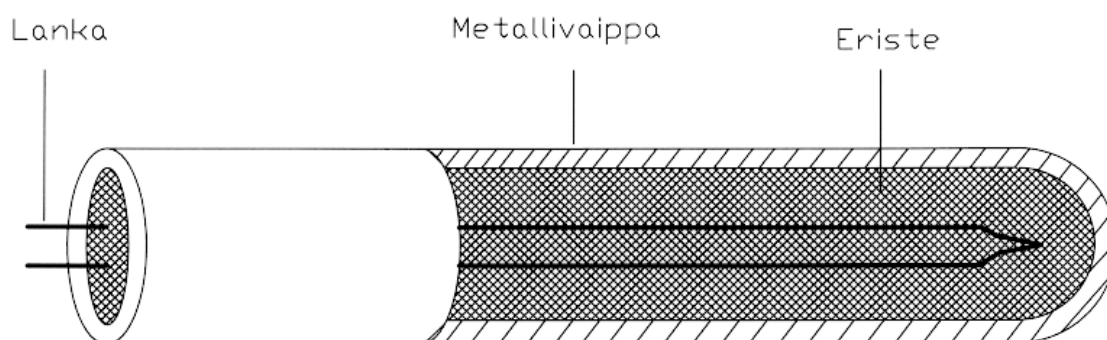
lan tasaisuus, pintamateriaalin emissiivisyys ja infrapunälämpömittarin optiikan virheet. [31]

Lämpötilan mittaaminen on hidas toimenpide paineen mittaamiseen verrattuna. Lämpötilamittarin asentamisen jälkeen tulee odottaa mittarin lämpötilan tasaantumisen mittaustilanteen lämpötilaan ennen varsinaisen mittauksen aloittamista. Lisäksi esimerkiksi vastuslämpötilamittareissa virta tulee kytkeä päälle hyvissä ajoin ennen mittausta, koska mittaustilanteen lämmittää mittaria aiheuttaen mittaustilanteen virhettä. Lämpötilan mittaustilanteen suoriteaan lukemalla mittaria useita kertoja, josta mittaustulos on mitattujen lämpötilojen keskiarvo. Teoriassa lämpötilan mittaustulos on arvio väliaineen todellisesta lämpötilasta mittaustilanteella johtuen erilaisista mittaustilanteen epävarmuuksista. Esimerkiksi mittarin näyttämä vaihtelee sen resoluutiosta johtuen vaikka väliaineen lämpötila pysyy muuttumattomana. Mittaustilanteen epävarmuuteen voi vaikuttaa myös vakiosuuruinen systemaattinen virhe. Systemaattisen virheen voi muodostaa esimerkiksi lämpötilamittarin anturin ja todellisen tilanteen välisestä etäisyydestä aiheutuva lämpötilaero. Systemaattinen virhe voi olla seurausta myös useista virhelähteistä, joiden yhteisvaikutus on muuttumaton lämpömittauksen aikana. [31]

Lasilämpötilamittareiden nestepatsaan nesteenä käytetään elohopeaa tai spriitä. Lämpötilan mittauksen luotettavuuden kannalta elohopea on spriitä parempi aine, mutta raskasmetallina sen käyttö on ympäristölle haitallista. Elohopealämpötilamittaria ei pystytä käyttämään sen jähmettymislämpötilaa $-38,8\text{ °C}$ alhaisemmissa lämpötiloissa, mutta sekoittamalla elohopeaan talliumia saadaan minimi käyttölämpötilaksi -50 °C . Elohopealämpötilamittarin maksimi käyttölämpötila voi olla jopa 500 °C , mutta näin suurissa lämpötiloissa mittarin kalibrointi ja käyttö tuottaa vaikeuksia. Tästä syystä korkeiden lämpötilan mittaamiseen soveltuu paremmin termoelementti lämpötilamittari. Spriimitarin käyttölämpötila-alue on välillä $-80\text{ °C} \dots +60\text{ °C}$, jossa lasilämpötilamittarin asteikon askelarvona voidaan käyttää jopa $0,01\text{ °C}$. Lasilämpötilamittarin lukemistarkkuus riippuu asteikon piirtoviivojen etäisyydestä toisistaan sekä mittaajan kokemuksesta. Yleisesti mittaaja kykenee erottamaan suuruudeltaan puolet asteikon askelarvosta tapahtuvat lämpötilan muutokset. Lasilämpötilamittaria tulee lukea kohtisuoraan mittaajan silmän ollessa nestepatsaan huipun korkeudella. Myös ennen mittauksia lasilämpötilamittaria on syytä myös kevyesti napauttaa, jotta nestepatsaan ja kapillaariputken välinen kitka ei muodosta mittaustilanteen virhettä. [31]

Termoelementti lämpötilamittarit ovat merkittävä käytössä oleva anturityyppi lämpötilan mittaukseen. Termoelementin yksinkertainen käyttö ja mittaustulosten luotettavuus sekä edullinen hinta luo siitä ominaisuuksiltaan kilpailukykyisen lämpötilamittarin muihin anturityyppeihin verrattuna. Suurien lämpötilojen mittaamisessa kuten yli 500 °C lämpötiloissa termoelementtien käyttö on vastusantureita yleisempää. Termoelementillä lämpötilan mittaus perustuu termosähköiseen ilmiöön. Termopari muodostetaan kahdesta eri sähköä johtavasta metallista valmistetusta langasta yhdistämällä ne virtapiiriksi. Termoparien liitoskohtien ollessa eri lämpötiloissa suljetussa virtapiirissä kulkeva virta havaitaan erottelukyvyltään herkällä mittarilla. Virran muodostavaa sähkömotorista voimaa kutsutaan termosähköiseksi jännitteeksi. Mitattava termojännite riippuu väliaineen ja vertailupisteen lämpötilojen eroista. Tämän johdosta mitattavan väliaineen lämpötilan määrittämiseksi on termojännitteen lisäksi tunnettava vertailupisteen lämpötila. [31]

Termoelementti eristetään ja suojataan ympäristön olosuhteiden muutoksien vaikutuksilta. Eristyksessä eristysaine ja suojaputki eivät saa muuttaa termoparin lankojen kemiallista koostumusta. Eristysaineen tarkoituksena on taata riittävä sähköinen eristyskyky käyttöolosuhteista riippumatta, jonka valinnassa on huomioitava väliaineen lämpötila ja lämpötilan vaihtelut. Termoelementin mittauspää voidaan valmistaa kuvan 15 kaltaisesta taipuisasta MI -kaapelista, jossa eristysaineena voidaan käyttää esimerkiksi magnesiumi- tai alumiinioksidi pulveria. MI -kaapelin käyttämisen etuina ovat pitkien termoelementtien valmistaminen, helppokäyttöisyys, hyvä sähköinen eristyskyky, pieni kaapelin halkaisija ja tärinän kestävyys. [31]



Kuva 15. Termoelementin mittauspäänä toimivan MI -kaapelin rakenne leikattuna [31].

Vastuslämpötilamittarin toiminta perustuu anturi-aineen sähköisen vastusarvon muuttumiseen lämpötilaan nähden. Termoelementin tapaan anturiosan muodostaa sähköä johtava metalli tai metalliseos, joka tulee asianmukaisesti asentaa ja suojata. Tavallisimmin käytetyt anturimateriaalit ovat platina, kupari, nikkeli tai metallioksidiseokset. Platinasta valmistetut kuvassa 16 esitetyt Pt100 -anturit ovat yleisiä vastuslämpötilamittareita. Pt100 -antureiden tyypillinen mittaustarkkuus on $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötila-alueella $-50\dots+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [31]



Kuva 16. Kuvassa on erilaisin liitäntäpistokkein varustettuja Pt100 -antureita [32].

Parhaaseen mittaustuloksen tarkkuuteen päästään anturikohtaisella kalibroinnilla, jossa lasketaan anturikohtaiset vakiopoikkeumat mittaustuloksesta. Anturin nollapisteen resistanssi R_0 tulee mitata ennen kalibroinnin aloittamista, vaikkei nollapiste sisältyisi kalibrointipisteisiin. Tietämällä nollapisteen R_0 -arvo voidaan anturin stabiiliutta seurata kalibroinnin aikana ja myöhempien kalibrointien välillä. Kalibrointien välillä pysyvä muutos R_0 -arvossa kuvaa anturin väärinkäyttämistä tai sen rakenteen muuttumista. R_0 -arvon muuttumisen syinä voi olla myös liian korkea käyttölämpötila, kosteus anturissa tai oikosulku käämityksessä. Suurissa pysyvissä R_0 -arvon muutoksissa Pt100 -anturi on poistettava käytöstä epäluotettavuuden johdosta. Anturin käyttökelvottomuuden voi myös aiheuttaa vastuksen langan katkeaminen esimerkiksi voimakkaan värinän seurauksena. Pt100 -anturin vastusta mitattaessa mittausvirta muodostaa lämpöä vastuksessa, jolloin anturin ja väliaineen välillä syntyy mittausvirhettä aiheuttava lämpötilaero. Muodostuva lämpötila riippuu anturin rakenteesta sekä anturin ja väliaineen välisestä lämmönsiirtokertoimesta. Pt100 -anturit liitetään mittauslaitteeseen kytkentärakenteeltaan 2-, 3- tai 4-

johtimisina. Johdinmateriaalina käytetään yleensä kuparia, jonka eristysvastus on riittävän hyvä. Johtimien vastusmuutokset lämpötilan johdosta aiheuttavat mittausepävarmuutta mittaustuloksiin. Tarkin vastusmittaus tehdään 4-johdinmittauksella, missä virta syötetään toisesta johdinparista virrattomaan johdinpariin, jonka jännite mitataan. [31]

Koskettamattomaan mittausmenetelmään perustuvassa lämpösäteilyn mittaamisessa eli pyrometriassa kohteen lämpötilaa mitataan käyttäen hyväksi kohteen pinnasta säteilevää energiaa. Pyrometriaa käytetään lämpötilan mittaamiseen kohteista, joihin tavanomaisen vastusanturien ja termoelementtien asentaminen on haastavaa. Pyrometreillä voidaan mitata kohteen lämpötiloja $-50\text{ °C} \dots +3000\text{ °C}$ välillä ja erikoistapauksissa kuvassa 17 olevilla lämpökameroilla jopa kahden kilometrin etäisyydeltä. Lämpökameran käyttäjältä vaaditaan hyvää ymmärrystä säteilypyrometrien toiminnasta sekä mitattavan kohteen ominaisuuksista luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi. [31]



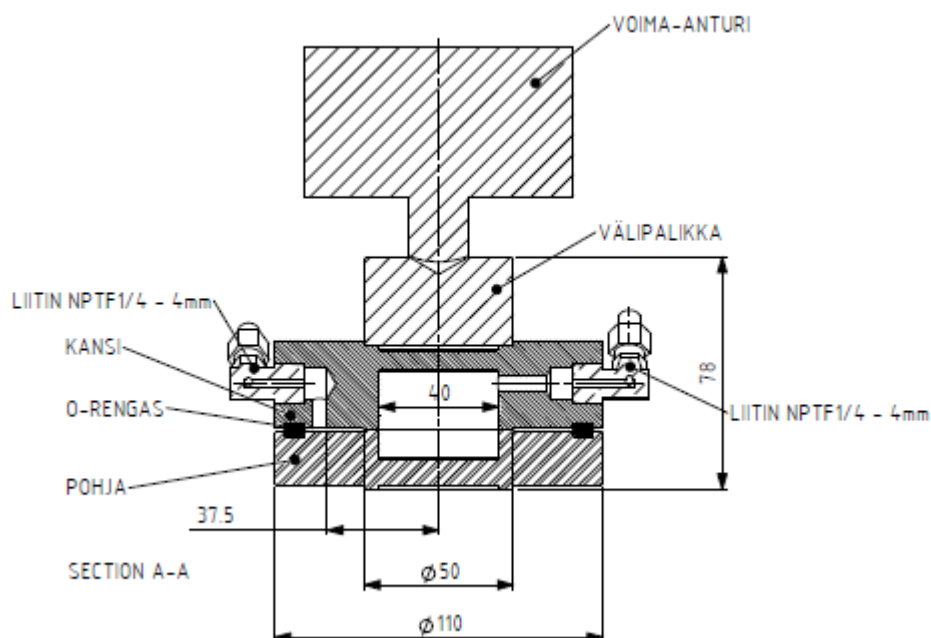
Kuva 17. Kuvassa on esitetty erilaisia lämpökameroita [31].

Lämpökameran rakenne muodostuu optiikasta, ilmaisimesta ja elektroniikasta, joilla muodostetaan lämpötilaan verrannollinen sähköinen signaali. Lämpökamera pyrkii rakenteensa puolesta mahdollisimman tehokkaasti keräämään kohteesta saadun lämpösäteilyn ilmaisimelle ja eliminoimaan häiriölähteistä mittauksen ulkopuolelta aiheutuvan säteilyn. [31]

9 Staattinen tiiviystestilaitteisto

9.1 Rakenne

Metso Automaation virtauslaboratoriossa jo ennestään kehitetty kuvassa 18 olevan staattisen tiiviystestilaitteiston tarkoituksena on testata eri pinnoitteiden vaikutusta tiivistepintojen välisen vuotovirtauksen määrään. Laitteiston runko koostuu kahdesta rakennemateriaaliltaan haponkestävästä teräksestä (AISI 316) valmistetusta vaihtokelpoisesta koekappaleesta. Koekappaleet - kansi ja pohja - muodostavat keskenään kontaktipinnassaan ympyränmuotoisen tasomaisen tiivistävän pinnan, joka on pinnoitettu testattavalla pinnoitemateriaalilla. Tiivistepintojen välistä tapahtuvan vuotovirtauksen kulkeutuminen ympäristöön estetään koekappaleiden välissä olevalla o-renkaalla. Tiivistepintojen välisen kuormituksen eli pintapaineen mittaaminen tapahtuu voima-anturin avulla. Tasainen kuormitus koko tiivistepinnalle varmistetaan voima-anturin ja kannen välissä olevalla välipalikkalla. Voima-anturin ulostulosignaalin käsittelyyn tarvitaan vahvistin, mittauskortti ja tietokone. Väliaineen johtaminen laitteistoon mahdollistetaan kannen väliaineen sisään- ja ulostulokanavissa olevilla pneumaattisilla pistoliittimillä ja niihin liitetyillä 6 mm muoviputkilla.



Kuva 18. Staattisen tiiviystestilaitteen rakenne puolileikattuna, jossa osien päämitat ovat ilmoitettu millimetreissä.

9.2 Toimintaperiaate

Staattisen tiiviystestilaitteiston toimintaperiaate voidaan jakaa pintapaineen muodostamiseen tiivistepintojen välillä, koekappaleiden paineistukseen kaasuväliaineella ja tiivistepintojen välisen vuotovirtauksen mittaukseen. Tiivistepintojen välinen pintapaine toteutetaan yksinkertaisesti mekaanisen kuormituksen avulla. Tiivistepintojen välinen puristuskuormitus muodostetaan voima-anturin päälle asetetulla jäykällä vipuvarrella, joka tuetaan pöytään kahdella vaarnaruuvilla ja kolmella kuusiomutterilla. Tiivistepintojen välinen pintapaineen suuruus säädetään kiristämällä vipuvarren tukipisteessä olevalla kuusiomutterilla samalla seuraamalla tietokoneelta voima-anturin ulostulosignaalin antamaa puristusvoimaa. Wägesellen typ C 2 -voima-anturin antama ulostulosignaali johdettiin signaalin vahvistimen ja NI 9219 -mittauskortin kautta tietokoneelle, jonka LabVIEW -pohjaisella ohjelmalla pintapainetta seurataan ajan suhteen. Kyseisessä mittausrjestelyssä signaalin vahvistin tarvitsi 24 V -virtalähteen. Halutun tiivistepintojen pintapaineen säädön jälkeen koekappaleiden välissä oleva sylinterin muotoinen painetila paineistetaan vakiopaineen alaiseksi kaasuväliaineella sisääntulokanavan kautta. Paine-tilasta tapahtuva mahdollinen kaasuväliaineen vuoto virtaa tiivistepintojen välistä vuodon painetilaan, joka on tiivistetty ympäristössä o-renkaan avulla. Kyseisestä painetilasta vuoto siirtyy kaasuväliaineen ulostulokanavaan vuodonmittausta varten. Vuodonmittaus toteutetaan yksinkertaisesti kuplamenetelmällä, jossa kaasuväliaineen ulostulokanavan pistoliittimeen yhdistetty muovinen vuotoputki upotetaan 5 mm vesiastian pinnan alle. Tiivistepintojen välistä tapahtuvan kaasuvuodon seurauksena vuodon painetilan paine kasvaa ja kaasukuplia alkaa muodostua vuotoputkesta vesiastiaan. Vuodonmittauksen vuotomäärä voidaan laskea muodostuvien kaasukuplien määränä ajan suhteen [kuplaa/min].

9.3 Testaus

Staattista tiiviystestilaitteiston toimivuutta testattiin käytännönkokeilla. Testissä käytettiin koekappaleita, joiden tiivistepinnat olivat pinnoitettu nikkeli-boori (NiBo) -pinnoitemateriaalilla. NiBo -pinnoitetut tiivistepinnat olivat viimeistelty koneellisesti hiomalla. Testiä varten tiivistepintojen pinnankarheutta parannettiin läppäämällä tiivistepinnat toisiaan vasten. Läppäys suoritettiin pyörittämällä käsin kantta samanaikaisesti pohjan suhteen käyttämällä tiivistepintojen välissä hienorakeista Amplex Superabrasi-

ves -timanttitahnaa. Testissä koekappaleiden tiivistepintojen välinen vuotovirtaus mitattiin ennen ja jälkeen tiivistepintojen läppäyksen, jonka perusteella voitiin verrata keskenään koneellisesti hiottujen ja käsin läpättyjen tiivistepintojen vuotoarvoja. Testissä muuttuvina testiparametreina olivat tiivistepintojen välinen pintapaine ja kaasuväliaineen paine. Testin väliaineena käytettiin paineilmaa painealueella 3-8 bar ja tiivistepintojen välisenä pintapaineena 10–35 MPa. Testit suoritettiin muuttamalla toista testiparametria toisen pysyessä vakiona, jonka jälkeen vuotovirtaus mitattiin.

Ennen testiä oletusarvona oli, että läppäyksellä mahdollistettu pienempi tiivistepintojen pinnankarheus takaisi paremman tiiviyn. Myös kaasuväliaineen paineen lisääminen ja tiivistepintojen pintapaineen vähentäminen tulisi kasvattaa vuotoarvoa. Liitteessä 1 olevat testin tuloksien kuvaajat osoittavat ennalta odotettua vuodon käyttäytymistä. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että pienempi tiivistepintojen pinnankarheus takaa paremman tiiviyn. Myös kaasuväliaineen paineen lisääminen ja tiivistepintojen pintapaineen vähentäminen kasvattaa vuotovirtausta. Saatuja testituloksia tärkeämpää oli tarkastella käytännössä laitteiston toimivuutta dynaamisen tiiviytestilaitteiston kehittämisen kannalta.

9.4 Laitteiston toimivuuden johtopäätökset

Testikokemuksen perusteella laitteiston suurin etu on sen konstruktion yksinkertaisuus. Tämän ansiosta laitteiston kokoonpaneminen ja testien suorittaminen on vaivatonta ja nopeaa. Konstruktion heikkoutena ovat koekappaleiden suuresta koosta ja kannen muodoista aiheutuvat niiden varsin suuret valmistuskustannukset. Tiivistepintojen välistä tapahtuvan kaasuvuodon tiivistäminen ympäristöstä antaa useita eri vaihtoehtoja vuodon mittausten valintaan. Kuitenkin vuodon painetilan tiivistäminen ympäristöstä o-renkaan avulla osoittautui ongelmalliseksi, koska osa kaasuvuodosta pääsi virtaamaan o-renkaan ja koekappaleiden o-rengasurien välistä ympäristöön. Tämä valekaasuvuoto todettiin suihkuttamalla tiivistykseen vuodonilmaisuainetta, jossa valekaasuvuoto havaittiin saippuakuplina. Valekaasuvuotoa saatiin pienennettyä lisäämällä vaseeliinia koekappaleiden o-rengasuriin. Rasvauksesta huolimatta urassa jouduttiin käyttämään puristavuodeltaan ylisuurta o-rengasta, jolla oli vääristävä vaikutus tiivistepintojen väliseen pintapaineen arvoon sen kantaessa osan puristusvoimasta. O-

rengastiivistyksen epäonnistuminen johtui mahdollisesti o-rengasuraan päässeestä pinnoitteen aiheuttamasta pinnan epätasaisuudesta tai o-rengasurien mitoitusvirheestä.

Kaasuväliaineen vuodonmittaukseen käytetty kuplamenetelmä on toimintaperiaatteeltaan yksinkertainen ja nopea suorittaa. Kuitenkin käytännöntestit osoittivat kyseisen menetelmän olevan mittausalueeltaan suppea sekä erottelukyvyltään huono pienten vuotovirtausten vertailuun, koska vähäiset testiparametrien muutokset eivät vaikuttaneet vuotoarvoon. Myös kuplamenetelmän mittausepävarmuuteen vaikuttivat vaihtelut vuotoputken upotuksen syvyydessä sekä sen kohtisuoruudessa nestepintaa nähden. Lisäksi kuplamenetelmän mittaustulosten epäluotettavuutta kasvattaa kaasuväliaineen lämpötilan huomiotta jättäminen, koska mittauksien välillä lämpötila ei ole täysin vakio. Näiden epävarmuustekijöiden vuoksi kuplamenetelmää voidaan pitää sopivana tarkkuudeltaan karkeaan vuodonmittauksen suuria vuotomääriä vertailtaessa. Haluttaessa absoluutisempia vuotoarvoja ja vertailtaessa pieniä vuotomääriä on syytä käyttää muuta vuodon mittausmenetelmää.

Lopuksi voidaan todeta, että kyseinen laitteisto soveltuu rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan kaasuväliainevirtauksen vuotomäärien vertailuun käyttämällä eri pinnoitemateriaaleja ja pinnanlaatuja tasomaisessa tiiviste-pintageometriassa. Erilaisesta tiiviste-pinnan rakenteesta johtuen laitteistolla saatuja vuotoarvoja ei voida suoraan verrata venttiilin vuotoarvoihin, vaan käyttää pinnoitemateriaalien ja niiden pinnankarheuksien vuotomäärien keskinäiseen vertailuun. Kuitenkin rakenteeltaan tasomainen tiiviste-pinta mahdollistaa pienemmät koekappaleiden valmistuskustannukset muihin geometrioihin nähden.

10 Dynaamisen tiiviystestilaitteiston luonnostelu

10.1 Vaatimuslista

Tiiviystestilaitteiston tuotekehitysprojektin tavoitteena oli suunnitella operoiva tiiviystestilaitteisto sulkuventtiilin sisäiseen vuotoon vaikuttavien tekijöiden tutkimukseen. Työn lähtökohtana toimi edellisessä kappaleessa esitetty staattinen tiiviystestilaitteisto. Kehitetyn dynaamisen tiiviystestilaitteiston tarkoituksena on tulevaisuudessa antaa tietoja kokeellisesti suoritettavien testin avulla tiiviystekijöistä venttiilien suunnitteluun. Dynaamisen tiiviystestilaitteiston luonnosteluun käytettiin järjestelmällisen koneen suunnittelun menetelmää. Ennen uuden laitteiston luonnostelua kerättiin tietoa tiiviyslaitteiston tavoitteista ja rajoituksista tiiviystekijöiden tutkimiseen. Työn tehtävänasettelu toteutettiin laatimalla vaatimuslista laitteistolle. Vaatimuslistan laadintaa varten pidettiin kaksi ideariihi-palaveria Metson venttiiliasiantuntijoiden kesken. Sekä ideariihien että kokemuseräisen tiedon pohjalta laadittiin liitteessä 2 oleva dynaamisen tiiviystestilaitteiston vaatimuslista.

10.2 Vaatimuslistan abstrahointi

Vaatimuslistan laadinnan avulla nostettiin tuotekehitysprojektin tiedon tasoa sekä saatiin syvällisempi käsitys dynaamisen tiiviystestilaitteiston suunnitteluun. Tiiviystestilaitteiston vaatimuslistan ydinolemusta tarkennettiin abstrahoinnilla K.-H. Rothin mallin mukaan. [33] Abstrahoinnissa tehtävänasettelun yleispätevyyttä ja oleellisuutta korostettiin analysoimalla vaatimuslistassa olevia toiminnollisia riippuvaisuuksia ja oleellisia reunaehtoja. Abstrahoinnin tavoitteena oli tunnistaa tuotekehitysprojektin oleelliset ongelmat lausemuodossa. Abstrahoinnin suorittaminen voidaan jakaa viiteen toiminnalliseen askeleeseen:

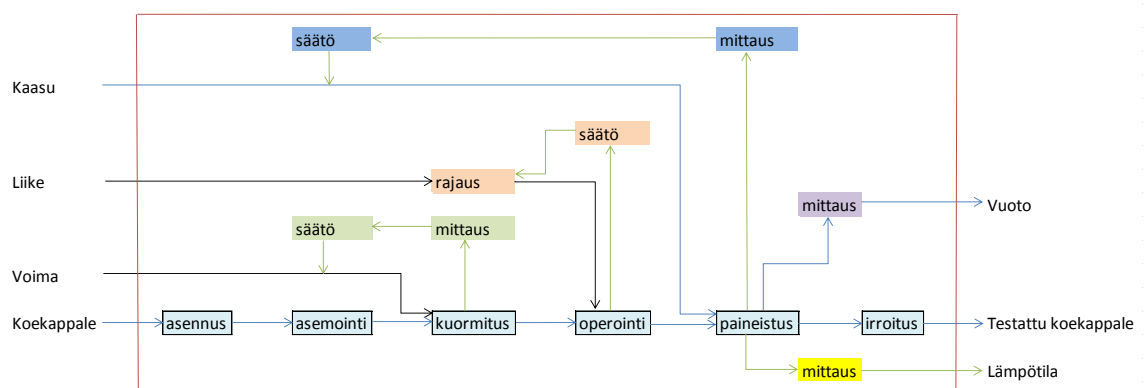
1. askel: Jätetään toivomukset pois.
2. askel: Jätetään sellaiset vaatimukset pois, jotka eivät välittömästi koske toimintaa ja oleellisia ehtoja.
3. askel: Määrälliset toteamukset muutetaan laadullisiksi ja supistetaan oleelliseen pitäytyviksi lausumiksi.
4. askel: Laajennetaan mielekkäästi tähän saakka tunnettua.

5. askel: Muotoillaan ongelma ratkaisuun nähden neutraalisti.

Vaatimuslistan abstrahointi on esitetty askelittain liitteessä 3. Vaatimuslistan abstrahoinnin tuloksena tuotekehitysprojektin oleelliset ongelmat muotoiltiin seuraavaksi lauseeksi: ”*Eriolaisten ja edullisten koekappaleiden tiivistepintojen välistä kaasuväliaineen vuotoa mitataan luotettavasti ja turvallisesti venttiilin operointia simuloivalla laitteistolla säädettävillä venttiilin vuotoon vaikuttavilla tekijöillä.*”

10.3 Toimintorakenteen laatiminen

Tiivistestilaitteistolle asetetut vaatimukset määrsivät systeemin toiminnon. Abstrahoinnin tuloksena saatu ongelman muotoilu lausemuodossa sisälsi työn oleellisen tavoitteen. Kokonaistehtävä muotoiltiin ydinolemuksensa mukaan, jolloin kokonaistoiminto voitiin esittää lohkokaaavion muodossa. Lohkokaavio oli tarkoitus esittää konkreettisesti, jossa kokonaistoiminto jaettiin osatoimintoihin ja edelleen niiden osatoimintoihin. Yksittäisten osatoimintojen yhdistäminen tuotti toimintorakenteen, joka esittää kokonaistoimintoa. Toimintorakenteen laatimisessa oli edullista, että sen avulla voitiin helposti erotella ja kehittää erillisenä laitteiston tunnettuja tai edelleen kehiteltäviä osasysteemejä suunnittelun aikana. Tiivistestilaitteistolle laadittu toimintorakenne on kuvassa 19.



Kuva 19. Tiivistestilaitteiston toimintorakenne lohkokaaviona. Yksittäiset osatoiminnot on yhdistetty nuolilla toimintorakenteen luomiseksi.

10.4 Vaikutusperiaatteiden haku ja konkretisointi

Toimintorakenteesta saaduille osatoiminnoille haettiin vaikutusperiaatteita systeemin vaikutusrakenteen muodostamiseksi. Vaikutusperiaatteiden hakuun käytettiin periaatteellisia mielikuvia, koska ratkaisua haettaessa on usein vaikea erottaa fysikaalinen ilmiö geometrisista ja aineellisista tunnusmerkeistä. Vaikutusperiaatteita konkretisoitaessa saatiin osatoiminnoille joukko periaatteellisia ratkaisuperiaatteita. Vaikutusperiaatteiden hakuun käytettiin tavanomaisia ja intuitiivisia menetelmiä. Tavanomaiset menetelmät perustuivat kirjallisuustutkimukseen ja staattisen tiiviystestilaitteiston testikokemuksen johtopäätöksiin. Mutkikkaimpien osasysteemien ratkaisunhaku suoritettiin pitämällä aivoriihiä asiantuntijoiden kesken hyödyntämällä eri henkilöiden kokemuseräistä tietoa.

10.5 Ratkaisuperiaatteiden yhdistäminen

Kokonaistoiminnon toteuttamiseksi yhdistettiin konkretisoidut ratkaisuperiaatteet vaikutusrakenteeksi. Ratkaisuperiaatteiden yhdistämisen perustana toimi toimintorakenne. Osatoiminnoille haetut ratkaisuperiaatteet koottiin F. Zwicky mukaiseen jäsentelykaavioon taulukkoon 3. [33] Tätä niin kutsuttua morfologista laatikkoa käytettiin kokonaisratkaisun hakuun valitsemalla jokaiselle osatoiminnoille jokin ratkaisuperiaate. Valitut ratkaisuperiaatteet yhdistettiin keskenään toimintorakenteen määräämässä järjestyksessä vaikutusrakenteeksi.

Taulukko 3. Tiiviystestilaitteiston morfologisessa laatikossa on taulukoitu osatoiminnoille vastaavat ratkaisuperiaatteet.

		Ratkaisuperiaate						
Osatoiminto		1	2	3	4	5	6	7
1	Vastakkaisten tiivistepintojen muodostus	Kartiomainen tiivistepinta	Lieriömäinen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta			
2	Tiivistepintojen kuormitus	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Pneumaattinen puristin				
3	Operoinnin liikesuunta	Lineaarinen	Rotaationaalinen					
4	Operoinnin toimilaite	Hydraulinen	Pneumaattinen	Sähköinen				
5	Koekappaleiden paineistus väliaineella	Alipaine	Ylipaine					
6	Väliaineen lämpötilan mittaus	Infrapuna-lämpötilamittaus	Termoelementti lämpötilamittaus	Vastus-lämpötilamittaus				
7	Väliaineen vuodonmittaus	Akustinen menetelmä	Haistelu-menetelmä	Kuplatestausta-menetelmä	Massaspektrometri-menetelmä	Paine-ero-menetelmä	Pommitus-menetelmä	Tyhjiötestaus-menetelmä

10.6 Sopivien periaateyhdistelmien valinta

Periaateyhdistelmiä valittaessa morfologisesta laatikosta tavoiteltiin mahdollisimman laajaa ratkaisukenttää, jottei sopivia ratkaisuperiaatteita sivuutettaisiin. Sopivia ratkaisuperiaatteita valittaessa virhevalinnan riskiä ei voida välttää, mutta käyttämällä hyödyksi valintamenetelmää voitiin riskiä pienentää. Valintamenetelmässä ratkaisuehdotuksia joko hylätään tai suositaan. Aluksi hylättiin selvästi sopimattomat ratkaisuehdotukset, jotka olivat vaikeasti ja kustannuksiltaan kalliita toteuttaa. Sellaisia ratkaisuehdotuksia suosittiin, jotka sekä täyttävät osatoiminnolle esitetyt vaatimukset ja toivomukset että olivat helposti toteutettavissa edullisin kustannuksin. Taulukossa 4 ylivedetyt vaikutusperiaatteet ovat hylättyjä ratkaisuperiaatteita ja jäljellä jääneet suositut ratkaisuperiaatteet muodostavat mahdolliset periaateyhdistelmät.

Vertailtaessa taulukon 4 suosittuja ratkaisuperiaatteita keskenään osatoiminnassa 1 palomainen tiivistepinta simuloi venttiilin rakenteen geometriaa todenmukaisemmin, kun taas tasomainen tiivistepinta mahdollistaa koekappaleiden pienemmät valmistuskustannukset. Osatoiminnassa 2 tiivistepintojen kuormittaminen hydraulisella puristimella on käytöltään vaivattomampaa, mutta vaatii enemmän tilaa ja hankintakustannuksia. Puolestaan mekaanisen puristimen hyötynä on sen mahdollinen käyttö samanaikaisesti laitteiston runkona. Osatoiminnassa 3 operoinnin liikesuunta toteutetaan rotaationaalisesti tiivistepintojen oikeanlaisen operointikulumisen mahdollistamiseksi. Osatoiminnassa 4 operoinnin toimilaitteena sähkömoottori on suorituskyvyltään pneumaattista toimilaitetta parempi, mutta hankintakustannuksiltaan kalliimpi. Osatoiminnassa 5 koekappaleiden paineistus väliaineella toteutetaan ylipaineistuksella, koska se mahdollistaa suuren joukon eri vaihtoehtoja vuodon mittausmenetelmän valintaan. Osatoiminnassa 6 väliaineen lämpötilan mittaaminen toteutetaan vastuslämpötilamittauksella parhaan mahdollisen mittaustarkkuuden saamiseksi. Osatoiminnassa 7 väliaineen vuodonmittaus massaspektrometrimenetelmällä vaatii tiivistepintojen välisen väliaineen vuodon tiivistämisen ympäristöstä, kun taas paine-eromenetelmässä vuotoa ei tarvitse tiivistää.

Taulukko 4. Morfologiseen laatikkoon tehdyn valintamenetelmän tulos. Taulukossa tummalla pohjalla olevat ratkaisuperiaatteet ovat hylättyjä vaihtoehtoja ja jäljelle jäävät suosittuja ratkaisuperiaatteita.

		Ratkaisuperiaate						
Osatoiminto		1	2	3	4	5	6	7
1	Vastakkaisten tiivistepintojen muodostus	Kartiomainen tiivistepinta	Lieriomainen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta			
2	Tiivistepintojen kuormitus	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Pneumaattinen puristin				
3	Operoinnin liikesuunta	Lineaarinen	Rotaationaalinen					
4	Operoinnin toimilaite	Hydraulinen	Pneumaattinen	Sähköinen				
5	Koekappaleiden paineistus väliaineella	Altpaine	Ylipaine					
6	Väliaineen lämpötilan mitta	Infrapuna-lämpötilamittaus	Termoelementti-lämpötilamittaus	Vastus-lämpötilamittaus				
7	Väliaineen vuodonmittaus	Akustinen menetelmä	Haistelu menetelmä	Kuplatestausta menetelmä	Massaspektrometri-men	Paine-ero-men	Pommitus-men	Tyhjiötestaus-men

Morfologisesta laatikosta valittiin 16 mahdollista periaateyhdistelmää tarkasteltavaksi, jotta päätös luonnoksen vahvistamisesta voitaisiin tehdä. Mahdolliset periaateyhdistelmät ovat esitetty numeroituna liitteessä 4.

10.7 Periaateyhdistelmien vertailu

Periaateyhdistelmien vertailussa hyödynnettiin F. Kesselringin kehittämää pistearviointia, mikä ilmoittaa ratkaisun arvon tavoitteeseen nähden [33]. Pistearviointi johti periaateyhdistelmien keskinäiseen vertailuun, kun ratkaisuja verrattiin kuviteltuun ideaaliratkaisuun. Ideaaliratkaisun pohjana toimii vaatimuslistassa määritetyt tavoitteet. Tavoitteista johdettiin arviointikriteerit ratkaisumuunnelmien arviointia varten. Arviointikriteerien merkityksellisyys ilmoitettiin painokertoimena, g_i , tärkeysjärjestyksessä ratkaisun kokonaisarvoon nähden. Arviointikriteerien arvokäsitys ilmaistiin antamalla pisteitä, w_j , välillä 0-10, joilla varsinainen arviointi periaateyhdistelmän ratkaisuperiaatteiden välillä tehtiin. Arviointikriteerien arvokäsityksien merkitykset ovat esitetty taulukossa 5. Periaateyhdistelmän kokonaisarvo saatiin laskemalla yhteen jokaisen periaateyhdistelmän osa-arvot. Ratkaisumuunnelmia verrattiin keskenään maksimaallisen kokonaisarvon määrittämällä tavalla, eli käytännössä paras ratkaisu sai korkeimman kokonaisarvon. Periaateyhdistelmien pistearviointi on liitteessä 5.

Taulukko 5. Arviointikriteerien arvokäsitykset taulukoituna periaateyhdistelmien ratkaisuperiaatteiden vertailuun.

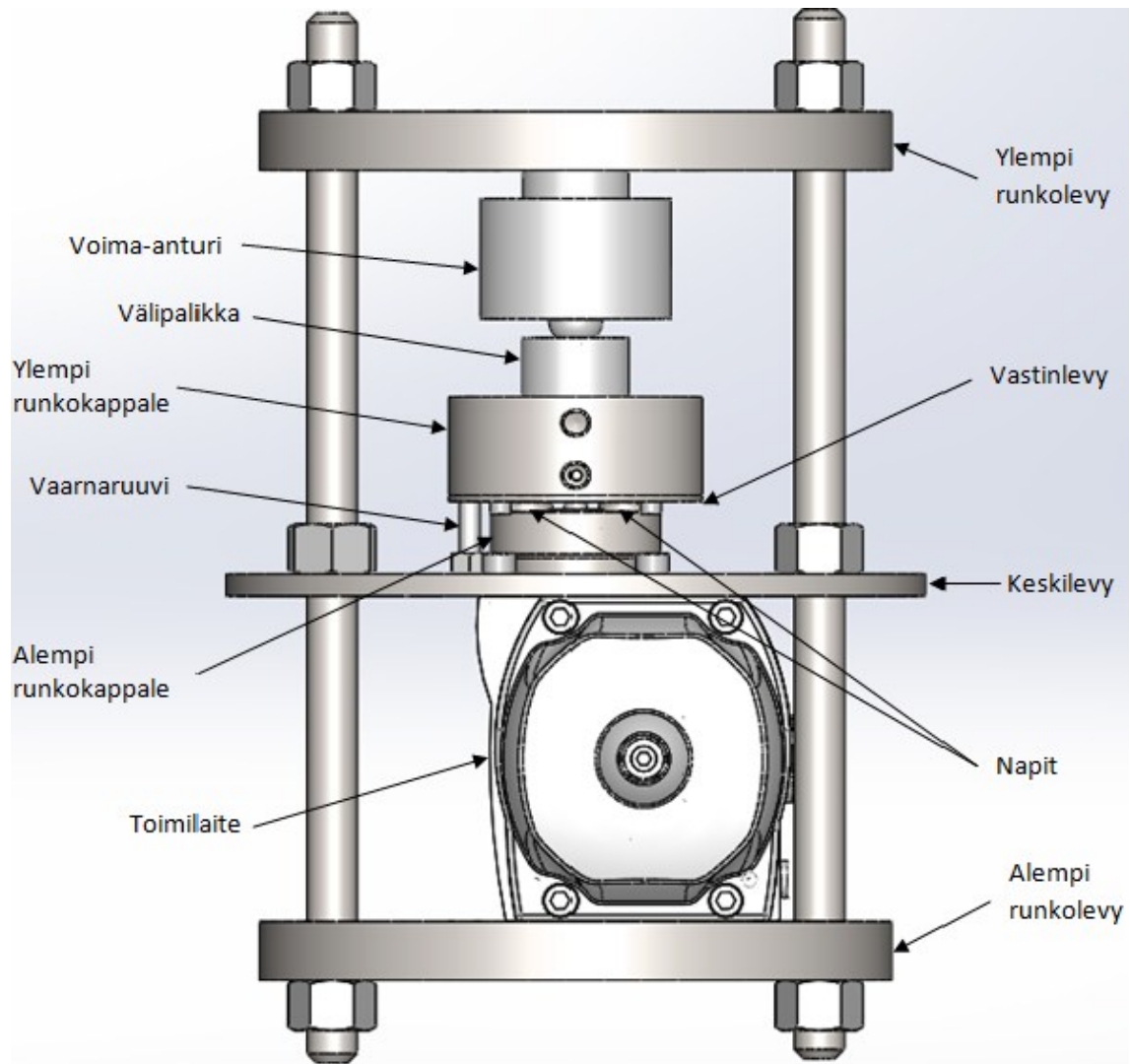
Arvo	Merkitys
0	sopimaton
1	puutteellinen
2	vaikea ratkaisu
3	hyväksyttävä
4	riittävä
5	tydyttävä
6	hyvä pieniä puutteita
7	hyvä ratkaisu
8	erittäin hyvä
9	yli tavoitteen
10	ideaaliratkaisu

Ratkaisumuunnelmien pistearvioinnissa periaateyhdistelmä 16 sai korkeimman kokonaisarvon 7,16 muihin nähden (katso liite 5). Kyseisen periaateyhdistelmän mukaiset ratkaisuperiaatteet valittiin tiivistestilaitteiston luonnoksen osatoiminnoiksi.

10.8 Valitun periaateyhdistelmän pohjalta tehty luonnos

Kuvassa 20 on esitetty tiivistestilaitteiston luonnospiiirros. Tarkoituksena oli luonnostella tiivistestilaitteisto rakenteeltaan mahdollisimman yksinkertaiseksi ja kustannuksiltaan edulliseksi, jolla voidaan testata valitun periaateyhdistelmän ratkaisuperiaatteiden keskinäistä yhteen toimivuutta. Luonnoksessa kaksi erillistä tasomaista ympyrämuotoista tiivistepintaa muodostavat kaksi nappia ja niiden vastinlevy. Nämä koekappaleet ovat kiinnitettyinä kiinteästi omiin runkokappaleisiin, jotka ovat tuettu toisiinsa ylemmässä runkokappaleessa olevan keskitapin ja alemmassa runkokappaleessa olevan upotuksen välisellä liukulaakeriholkilla. Liukulaakerointi runkokappaleiden välillä mahdollistaa tasaisen pyörivän ja pystysuuntaisen liikkeen runkokappaleiden välillä. Väliaineen sisääntulokanava molemmille tiivistepinnoille on hahmoteltu ylempään runkokappaleeseen, jonka kierrereikiin vuodon mittauslaitteet liitetään. Alempaa runkokappaletta pyöritetään pneumaattisella toimilaitteella, joka on kiinnitetty kiinteästi laitteiston rungon keskilevyyn. Alempaa runkokappaletta pyörittäessä ylemmän runkokappaleen mukana pyöriminen on estetty keskilevyyn kiinnitetyn vaarnaruuvien avulla, joka ohjataan ylemmässä runkokappaleessa olevan reiän lävitse. Laitteiston rungon muodostavat runkolevyt ja keskilevy, jotka ovat liitettynä toisiinsa kierretangoilla mutterein

jäykästi kiristettynä. Tiivistepintojen välinen pintapaine toteutetaan mekaanisesti säätämällä ylemmän runkolevyn yläpuolella olevilla muttereilla. Pintapainetta mitataan voima-anturilla staattisen tiivistestilaitteiston tavoin välipalikan jakaessa pintapaineen tasaisesti tiivistepintojen välillä.



Kuva 20. Tiivistestilaitteiston luonnoksen rakenne ja sen tärkeimmät osat nuolin merkittynä.

11 Dynaamisen tiiviystestilaitteiston kehittäminen

11.1 Laitteiston suunnittelu ja valmistaminen

Dynaamisen tiiviystestilaitteiston konstruktioa alettiin suunnitella tehdyn luonnoksen pohjalta. Suunnittelussa apuna käytettiin tietoavusteista suunnittelua (Computer-aided design, CAD). CAD -suunnittelu suoritettiin SolidWorks 2013 -ohjelmalla (Dassault Systemes S.A.). Ohjelmalla luotiin laitteiston osista 3D -kokoonpanomalli osien yhteensovittamisen helpottamiseksi. Laitteiston suunnittelussa tilattavista osista laadittiin työpiirustukset osien valmistamiseen. Tilattavien osien toimittajat kilpailutettiin eri alihankkijoiden laatimien tarjousten avulla. Tämän diplomityön aikana tiiviystestilaitteistosta suunniteltiin ja valmistettiin kaksi prototyyppiä Metso Automaation virtauslaboratoriossa.

11.2 Ensimmäinen prototyyppi

11.2.1 Rakenne

Tiiviystestilaitteiston ensimmäisen prototyyppi on esitetty kuvassa 21. Laitteiston operoinnin toimilaitteena käytettiin pneumaattista toimilaitetta. Toimilaite kiinnitettiin neljällä kuusiokoloruuvilla keskilevyyn. Tämä valurautainen keskilevy toimi osana laitteiston runkoa teräksisten venttiilin koeponnistuslaippojen välissä, jotka liitettiin toisiinsa kierretangoilla mutterein kiristettynä. Toimilaitteeseen kiinnitettiin pyörähdyskappale puristus- ja kiilaliitoksella. Pyörähdyskappaleessa oli kaksi upotusta nappeja ja yksi keskitappia varten. Laitteistossa olevat napit kiinnitettiin pyörähdyskappaleeseen ja ne simuloivat venttiilissä olevaa suljinelintä. Nappien tiivistepintoja vasten oleva vastinlevy kiinnitettiin painekappaleeseen simuloiden venttiilin tiivistintä. Pyörähdyskappale kohdistettiin samankeskiseksi painekappaleeseen siinä olevan keskitapin avulla. Keskitappi tuettiin pyörähdyskappaleeseen itsevoitelevalla öljypronssiukulaakeriholkilla. Painekappaleen paikallaan pysyminen operoinnin aikana toteutettiin alumiinisen tukilevyn avulla, joka kiinnitettiin painekappaleeseen kahdella sokalla ja kuusiomutterein laitteiston kierretangoihin. Painekappaleen yläpuolelle asetettiin voima-anturi, ja sen yläpuolelle väliholkki sekä alapuolelle välipalikka, jotka mahdollistivat kohtisuoran puristusvoiman tuottamisen koekappaleiden tiivistepinnoille. Painekappaleeseen liitettiin kaasuväliaineen tuloputkisto, jonka yhteydessä oli painelähetin ja sulkuventtiili.

Voima-anturin ja painelähettimen signaalit johdettiin vahvistimen ja mittauskortin kautta tietokoneelle.

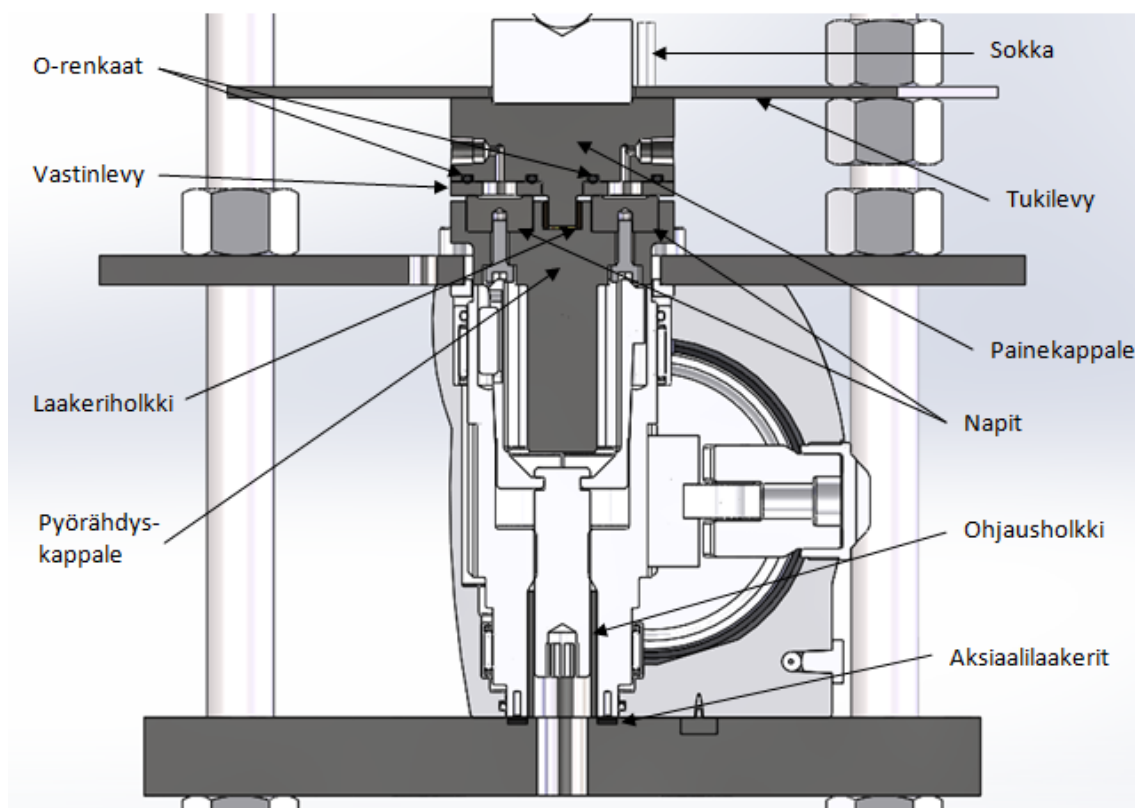


Kuva 21. Dynaamisen tiivistestilaitteiston ensimmäinen prototyyppi Metso Automaation virtauslaboratoriossa.

11.2.2 Koekappaleet

Koekappaleet - napit ja vastinlevy - muodostivat laitteiston vaihtokelpoiset osat, joiden tiivistepintojen leveyttä ja pinnoitemateriaalia on mahdollista muuttaa. Kuvan 22 tavalla napit mitoitettiin yhtä etäälle pyörähdyskappaleen keskikohdasta samankeskiseksi vastinlevyn virtausaukkoja nähden. Napit asetettiin pyörähdyskappaleen upotuksiin kiinnittämällä ne jämakästi kuusiokoloruuvein ja vastaavasti vastinlevy painekappaleeseen kahdella senkkiruuvilla. Vastinlevyn ja painekappaleen väliin asetettiin kaksi o-rengasta tiivistämään niiden välisen pinnan valevuodon välttämiseksi painetilan paineistuksen aikana. Ennen koekappaleiden asentamista laitteistoon niiden tiivistepinnat pinnoitettiin 60 μm vahvuisella kovakromikerroksella pintojen liukuominaisuuksien parantamiseksi operointivaiheessa. Koekappaleiden valmistuksessa oli ehdottoman tärkeää saada tiivistepinnat mahdollisimman tasomaisiksi. Myös nappien tiivistepintojen pinta-alojen tuli

olla keskenään yhtä suuria epäluotettavuuden välttämiseksi vuodonmittauksessa. Vastakkaisten tiivistepintojen tasaisuutta parannettiin pinnoituksen jälkeen läppäämällä tiivistepinnat hienorakeisella Amplex Superabrasives -timanttitahnalla toisiinsa täysimittaisen kontaktipinnan saavuttamiseksi.



Kuva 22. Ensimmäisen prototyypin rakenne poikkileikkauksena ja merkittynä sen tärkeimmät osat.

11.2.3 Toimintaperiaate

Laitteiston tarkoituksena oli mitata tiivistepintojen välistä muodostuvaa kaasuvuotoa eri vuotoon vaikuttavilla tekijöillä sekä ennen että jälkeen tiivistepintojen operoinnin. Laitteiston toimintaperiaate voidaan jakaa neljään eri systeemiin

- pintapaineen muodostamiseen tiivistepintojen välillä,
- painetilan paineistukseen kaasuväliaineella,
- tiivistepintojen välistä muodostuvaan kaasuvuodonmittaukseen ja
- tiivistepintojen operointiin.

Nappien ja vastinlevyn tiivistepintojen välinen pintapaineen säätäminen muodostettiin ylemmän koeponnistuslaipan yläpuolella olevilla neljällä kuusiomutterilla. Neljästä säätömutterista johtuen koeponnistuslaipan asennossa esiintyi vinoutta, jota piti kompensoida voima-anturin molemminpuolisilla pallopinnan omaavilla välipalikoilla ja väliholkoilla. Näiden avulla mekaanisesti toteutettu puristuskuormitus saatiin kohdistettua tasaisesti voima-anturin välityksellä koekappaleiden tiivistepinnoille. Voima-anturina käytettiin Wägesellen typ C 2, jonka kuormituksen maksimi kestäkyky oli 5 t. Voima-anturin ulostulosignaali jännite ohjattiin vahvistimen ja NI 9219 -mittauskortin kautta tietokoneelle, jossa signaalia käsiteltiin puristusvoimana LabVIEW -pohjaisella ohjelmalla. Puristusvoima voitiin muuttaa tiivistepintojen väliseksi pintapaineeksi kaavan 1 avulla. Kyseisessä mittausjärjestelyssä signaalin vahvistin tarvitsi 24 V -virtalähteen.

Tiivistepintojen pintapaineen säätämisen jälkeen painetila paineistettiin kaasuväliaineen tuloputkistoa pitkin haluttuun paineeseen paineensäätimellä varustetun painemittarin avulla. Paineistuksen aikana tiivistepintojen välistä muodostuvan väliaineekaasun vuodonmittaus toteutettiin mittaamalla väliaineen painetta ajan suhteen. Väliaineen paineen mittaamiseen käytettiin Trafagin venymäliuska NAT -painelähetintä, jonka mittausalue oli 0-6 bar. Laitteiston painetila ja paineilmalinjaston välinen yhteys katkaistiin vuodonmittauksen ajaksi Swagelokin sulkukäyttöön tarkoitetulla palloventtiilillä. Mittauksessa vuodon muodostuessa ja painetilan paineen laskiessa painelähtetimen lähettämä reaaliaikainen ulostulosignaali jännite johdettiin NI 9203 -mittauskortin kautta tietokoneelle. Tietokoneella signaalia käsiteltiin paineen arvona LabVIEW -pohjaisella ohjelmalla, joka muutettiin vuotoarvoksi kaavoja 4 ja 5 käyttämällä. Väliaineen lämpötilan suhteen jouduttiin tekemään kompromissi, koska ei ollut mahdollista mitata lämpötilaa suoraan väliaineesta. Väliaineen lämpötilana jouduttiin pitämään ympäristön lämpötilaa eli käytännössä koekappaleesta mitattua lämpötilaa.

Vuodonmittauksen jälkeen paineet poistettiin painetilasta avaamalla sulkuventtiili, jonka jälkeen tiivistepintoja voitiin operoida. Operoinnin toimilaitteena toimi Neleksen kaksitoiminen kaksoiskalvotoimilaite EC-10, jonka ulostulomomentti 8 bar syöttöpaineella oli 250 Nm. Toimilaitteen sallima käyttölämpötila oli -20...+70 °C, ja sitä ohjattiin syötetyllä paineilmallä. Toimilaitteen iskunpituutta säädettiin sylinterin päädyissä olevien rajoitusruuvien avulla. Operoinnissa pyörähdyskappale teki edestakaista liikettä välillä 0-55°, niin että nappi meni vastinlevyn virtausaukon ylitse simuloiden todellisen

prosessiventtiilin tapausta. Syötetyn paineilman suuntaa toimilaitteeseen ohjattiin Norgrenin magneettiventtiilillä, joka sääteli kumpaa toimilaitteen painekammioista paineilma menee, ja kummasta paineilma purkaantuu. Magneettiventtiilin ulostuloissa olevilla Norgrenin kuristimilla voitiin säätää ulostuloilman nopeutta ja täten operoinnin liikenopeutta. Magneettiventtiilin toimintaan säädeltiin ajastimella, jonka avulla voitiin asettaa operointilukumäärä ja operoinnin toistettavuusaika. Magneettiventtiili ja ajastin tarvitsivat 24 V -virtalähteen. Operoinnin aikana oli pidettävä tiettyä pintapainetta tiivistepintojen välillä, jolloin toimilaitteeseen kohdistui pystysuunnassa alaspäin suuntautuva voima. Tämä voima oli otettava vastaan alempaan koeponnistuslaippaan toimilaitteen kestämiseksi. Koeponnistuslaipan ja toimilaitteen akselin pyörivän liikkeen väliin asetettiin kaksi stelliittistä aksiaalilaakeria akselin kulumisen välttämiseksi kuvan 22 mukaisesti. Aksiaalilaakereita pidettiin samankeskisinä ohjausholkin avulla, jottei ylimääräisiä sivuttaisliikkeitä aksiaalilaakerien välillä pääsisi muodostumaan.

11.2.4 Laitteiston testaaminen

Ensimmäisen prototyypin testaamisen tärkeimmät tutkittavat seikat olivat tiivistepintojen tasomainen geometria sekä operoinnin käyttäytyminen. Valmistetun laitteiston tavoitteena oli osoittaa ja todeta oliko valitut osatoiminnot - pneumaattinen toimilaite, paine-eromenetelmä ja tiivistepintojen mekaaninen kuormitustapa - toimivia yhdessä tasomaisen tiivistepintaratkaisun kanssa. Ensimmäisellä prototyypille tehtyjen testien perusteella arvioitiin sen toimivuutta käytännössä sekä analysoimalla sen antamia vuototuloksia. Testien vuototuloksia verrattiin keskenään ja muuttuvina tiiviystekijöinä pidettiin väliaineen painetta, tiivistepintojen pinnankarheutta, tiivistepintojen välistä pintapainetta, operointi lukumäärää ja voiteluaineen vaikutusta tiivistävillä pinnoilla.

Ennen testien aloittamista suoritettiin laitteiston kaasuväliaineen painetilan tilavuuden, V_k , määrittäminen vuodonmittausta varten. Painetilan tilavuus muodostui vastinlevyn virtausaukosta ja painekappaleen virtauskanavasta sekä siihen liitetystä väliaineen tuloputkistosta sulkuventtiiliin asti. Painetilan tilavuus määritettiin kokeellisesti puhtaan veden avulla. Tilavuuden määrittämisen ajaksi painelähetin korvattiin tulpalla, jottei sitä vahingoitettaisiin vedellä. Varsinainen tilavuuden määrittäminen suoritettiin täyttämällä painetila vedellä ja punnitsemalla laitteisto ennen ja jälkeen veden täytön. Painetilan tilavuuden mittaaminen suoritettiin kolme kertaa, joiden keskiarvo määritettiin. Veden

lämpötilana käytettiin 20 °C, jonka taulukosta saatua tiheyden arvoa käytettiin tilavuuden määrittämisessä. [30] Laitteiston kaasuväliaineen painetilan tilavuuden arvoksi saatiin $V_k = 19,93 \text{ cm}^3$.

Lisäksi ennen testaamista napeista ja vastinlevyistä mitattiin tiivistepinnan pinnankarheuden keskiarvo tasavälein neljästä kohtaa mitattuna kullekin koekappaleelle Mahr Perthometer M1 -pinnankarheusmittarilla. Luotettavien vuototulosten saamiseksi laitteistolle suoritettiin koeponnistus valemuotojen poissulkemiseksi. Koeponnistuksessa laitteisto paineistettiin paineilmalla 5 bar paineeseen, ja tiivistepintojen väliin asetettiin kumitiivisteet vuodon estämiseksi. Tiivistepintojen pintapaineeksi asetettiin 50 MPa ja väliaineen paineen muutosta seurattiin 20 minuutin ajan. Väliaineen paineen pysyessä vakiona voitiin todeta systeemin olevan vuotamaton ja täten luotettava vuodonmittaukseen. Laitteistolla tehtyjen testien aikana ympäristön eli väliaineena käytetyn paineilman lämpötilana pidettiin $T = 27,5 \text{ °C}$ ja saadut vuototulokset ovat esitetty liitteessä 6.

11.2.5 Johtopäätökset

Ensimmäisen prototyypin testeillä saadut vuototulokset osoittivat laitteiston antavan yhdenmukaisia tuloksia Hauhian esittämiin johtopäätöksiin verrattuna:

- Tiivistepintojen välistä pintapainetta lisättäessä vuoto vähenee.
- Väliaineen painetta lisättäessä vuoto kasvaa.
- Tiivistepintojen pinnankarheutta suurentaessa vuoto kasvaa.

Tämän lisäksi voitiin esittää johtopäätökset tiivistepintojen operoinnin vaikutuksesta vuotoon:

- Puhtaiden tiivistepintojen operointi kasvattaa vuotoa.
- Voideltujen tiivistepintojen operointi vähentää vuotoa.
- Ennen operointia puhtaat tiivistepinnat takaavat paremman tiiviyn voideltuihin tiivistepintoihin verrattuna.
- Operoinnin jälkeen voidellut tiivistepinnat takaavat paremman tiiviyn puhtaisiin tiivistepintoihin verrattuna.

Voiteluaineen lisäämisestä johtunut tiiviiden parantuminen operoinnin jälkeen oli todennäköisesti seurausta voiteluaineen, Molykote D-321R -liukulakan, molekyylien tunkeutumisesta tiivistepinnan huokosiin parantaen näin tiivistepintojen kontaktia.

Testien yhteydessä laitteiston toiminnasta tehtiin johtopäätöksiä käytännön toimivuuden perusteella. Laitteiston runko osoittautui olevan riittävän vahva ja tukeva koekappaleiden kuormittamista varten. Kuitenkin rungon konstruktiosta johtuva ylimääräinen laitteiston osien purkaminen ja liikuttaminen työpöydällä koekappaleiden vaihtamista varten teki laitteiston käytöstä riskialtista ja hidasta käyttäjälleen. Laitteiston osien purkaminen ja liikuttaminen työpöydällä voitaisiin jatkossa ehkäistä muuttamalla rungon rakennetta jättämällä toimilaitteen alle tyhjää tilaa pyörähdyskappaleen irrottamista varten. Koekappaleiden operoinnin aikana painekappaleessa havaittiin nykivää liikettä. Liikkeen estämiseksi sekä tukilevyn että painekappaleen sokkien reikien tulisi tulevaisuudessa olla keskenään mittatarkemmat halkaisijoiden yhtäsuuruuden ja samankeskiisyyden suhteen. Näiden lisäksi tiivistepintojen välisen pintapaineen muodostaminen voitaisiin nopeuttaa suorittamalla säätäminen neljän mutterin sijasta yhdellä säädöllä. EC -toimilaite osoittautui olevan toimiva sekä riittävän kestävä tiivistepintojen operointiin kestätyään siihen kohdistuneet voimat operoitaessa koekappaleita ylisuurella 10 kN puristusvoiman alaisena. Operointiliike simuloi hyvin venttiilin tapausta kulumisjäljen muodostuessa poikittaissuunnassa tiivistepintojen yli. Lisäksi napin operointiliikerata oli asianmukaista vastinlevyn virtausaukon yli menevää edestakaista liikettä, jonka liike- ja toistonopeus olivat säädettävissä.

Tiivistepintojen toteuttaminen tasomaiseen geometriaan osoittautui olevan potentiaallinen ratkaisu. Kuitenkin operoinnissa muodostui tiivistepintojen haitallista abrasiivista- ja adhesiivista kulumista kuvan 23 kaltaisesti. Adhesiivinen kulumisen muodostui pintojen kiinnileikkaantuessa toisiinsa liian suurta pintapainetta käytettäessä kromiliukuparin välillä. Pienentäessä pintapainetta ja lisäämällä liukulakkavoiteluainetta, Molykote D-321R, kiinnileikkaantuminen vältettiin kuten kuvassa 24. Abrasiivisessa kulumisessa tiivistepintojen naarmut muodostuivat muokkauslujittuneiden partikkelien kyntäessä tiivistepintaa. Tiivistepinnan kulumisen johtui myös mahdollisesti pyörähdyskappaleen ja painekappaleen välisestä kaatumisesta toisiaan nähden operoinnin aikana. Kyseinen kaatuminen selittyi pyörähdys- ja painekappaleen välisen liukulaakeroinnin väljyydestä. Itsevoiteleva öljypronssiliukulaakeriholkki suunniteltiin liian väljäksi keskitappiin näh-

den, jolloin koekappaleiden tiivistepinnat eivät olleet yhdensuuntaiset operoinnin aikana. Liukulaakerointi toteutettiin uusiksi pidentämällä ja leventämällä keskitappia sekä korvaamalla liukulaakeri Pampus -laakeriliuskalla. Täten laakerointi saatiin likimain kokonaan välyksettömäksi, jonka jälkeen haitallinen kuluminen vältettiin kuvan 24 tavalla. Uuden laakerointiratkaisun lisäksi koekappaleiden tiivistepintojen yhdensuuntaisuuden takaamiseksi operointia on mahdollista tasapainottaa lisäämällä laitteiston rakenteeseen kolme nappia olemassa olevan kahden sijasta. Lisäksi haitallista kulumista tiivistepintojen välillä voitaisiin jatkossa minimoida valmistamalla koekappaleiden tiivistepinnoista tarkemmat toisiinsa tasomaisuuden suhteen.



Kuva 23. Nappien ja vastinlevyn tiivistepintojen välinen haitallinen kuluminen muodostui kiinnileikkaantumalla ja kyntämällä operoinnin aikana.



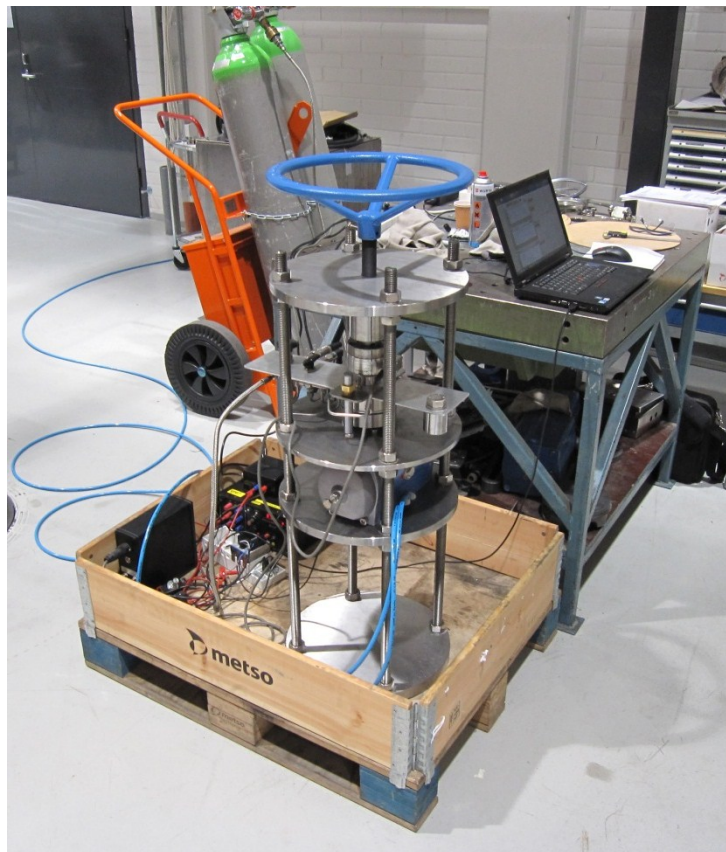
Kuva 24. Molykote D-321R -liukulakalla voidellun vastinlevyn tiivistepinnan operoinnin kulumisjälki laitteiston uuden laakeriratkaisun ja napin kiinnitystavan käytön jälkeen.

Testeissä nappien ruuvikiinnitys pyörähdyskappaleeseen aukesi koekappaleiden operoinnin aikana. Tämä sai aikaan napin pyörimisen oman akselinsa suhteen, mikä aiheutti epätasaista kulumisjälkeä tiivistepinnoille sekä mittausvirhettä vuototuloksiin. Uutta nappikiinnitystapaa kokeiltiin korvaamalla ruuvikiinnitys liimaamalla pyöreänmuotoinen 0,8 mm paksuinen kumilevy napin pohjaan. Nappia puristettaessa operoinnin aikana kumilevyn muodostama kitka pyörähdyskappaleen upotuksen pohjan kanssa sai napin pysymään paikallaan. Väliaineen tuloputkiston liittimet sekä o-renkaat vastinlevyn ja painekappaleen välissä ei muodostaneet systeemin valevuotoa, sillä koeponnistuksessa laitteisto osoitti olevan tiivis ja siten luotettava vuodonmittaukseen. Paineeromenetelmällä suoritettu vuodonmittaus osoitti olevan mittaustulosten erottelukyvyltään riittävän tarkka pienten vuotoarvojen mittaamiseen ja vertailuun. Kuitenkin paineeromenetelmällä toimiva vuodonmittaus vaatii väliaineen lämpötilan vaikutuksen huomioon ottamisen, sillä lämpötilan muuttuminen eri mittauksien aikana heikentää mittaustuloksen luotettavuutta. Seuraavassa prototyypissä vuodonmittauksessa paineeromenetelmää käytettäessä tarvitaan lämpötilan mittaus suoraan väliaineesta, jotta reaaliajassa tapahtuva lämpötilan mittaaminen on mahdollista.

11.3 Toinen prototyyppi

11.3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Dynaamisen tiiviystestilaitteiston toista prototyyppiä kehitettiin ensimmäisen prototyypin testien johtopäätöksiä perusteella. Tiiviystestilaitteiston toinen prototyyppi on esitetty kuvassa 25. Laitteisto asetettiin sen korkeudesta johtuen lattiatasolle lavan päälle sen käytön helpottamiseksi. Laitteiston erilliset mittalaitteet asetettiin sen viereen lavalle, ja mittalaitteistoon kytketty tietokone asetettiin työpöydälle. Vuodonmittaukseen tarvittu synteettinen paineilma saatiin kaasupullosta ja operointiin toimilaitteelle paineilmalinjastosta. Laitteiston yksityiskohtaisempi rakenne on esitetty liitteessä 7 räjäytyskuvana, jossa osat on erotettuna irrallaan toisistaan. Räjäytyskuvan selkeyttämiseksi laitteiston erilliset osat on nimetty ja numeroitu kuvassa olevaan osaluetteloon.



Kuva 25. Tiiviystestilaitteiston toisen prototyypin rakenne kokonaisuudessaan.

Laitteiston toimintaperiaate noudattaa ensimmäistä prototyyppiä, ja se voidaan jakaa neljään eri systeemiin:

- pintapaineen muodostamiseen tiivistepintojen välillä,
- painetilan paineistukseen kaasuväliaineella,
- tiivistepintojen välistä muodostuvaan kaasuvuodonmittaukseen ja
- tiivistepintojen operointiin.

11.3.2 Runko

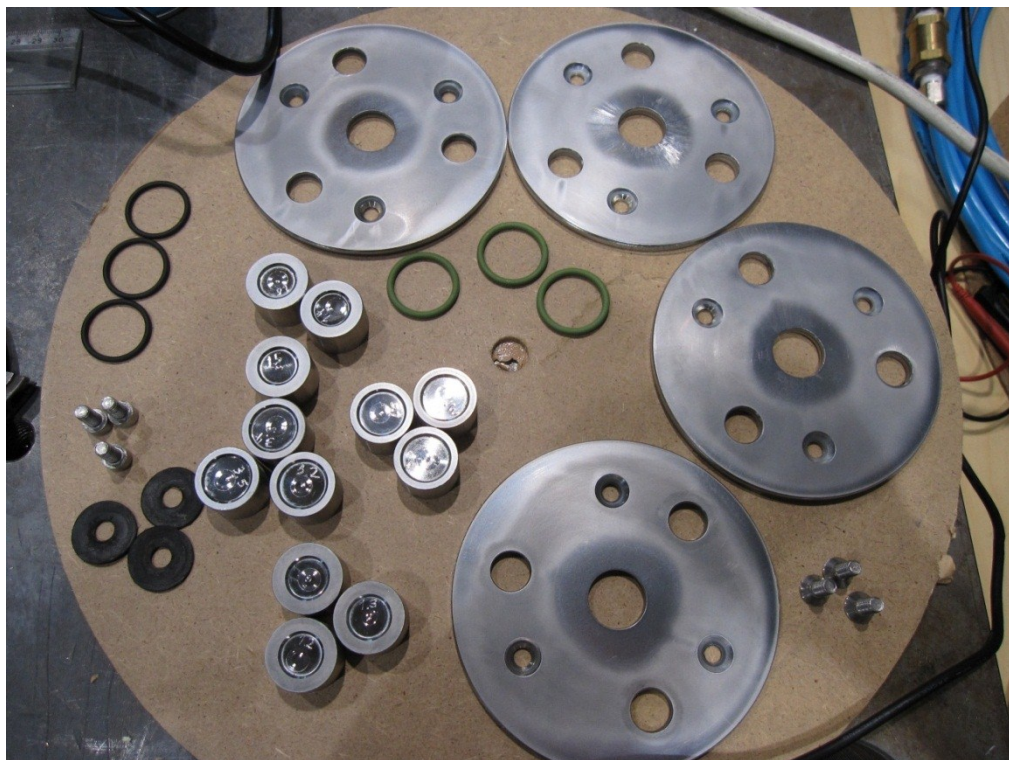
Laitteiston runko on esitetty kuvassa 26 ja se muodostuu neljästä runkolevystä (osista 1, 3, 7 ja 13, Liite 7), jotka yhdistettiin toisiinsa neljällä kierretangolla (osalla 9, Liite 7) mutterikiristyksellä. Muttereiden (osien 10, Liite 7) kiristyksen pitävyys varmistettiin niiden ja runkolevyjen välissä käytetyillä lukituslaatoilla (osilla 21, Liite 7). Toimilaite (osa 2, Liite 7) kiinnitettiin kiinteästi runkoon keskimmäisten runkolevyjen (osien 1 ja 3, Liite 7) väliin ruuveilla (osilla 8, Liite 7). Kahden alimmaisien runkolevyjen (osien 1 ja 13, Liite 7) väliin jätettiin tilaa toimilaitteen alta tapahtuvan pyörähdyskappaleen (osan 30, Liite 7) kiinnitystä ja irrotusta varten. Toiseksi ylimmän runkolevyn (osan 3, Liite 7) päälle asennettiin kaksi ohjaustankoa (osaa 18, Liite 7) painekappaleen (osan 12, Liite 7) kiinnitystä varten.



Kuva 26. Toisen prototyypin rakenne ennen koekappaleiden kiinnitystä laitteistoon. Kuvassa on esitetty tiivistestilaitteiston runko, toimilaite ja pintapaineen säätö.

11.3.3 Koekappaleet ja niiden valmistelu

Koekappaleina käytettiin kuvassa 27 esitettyjä nappeja (osia 28, Liite 7) ja vastinlevyjä (osia 29, Liite 7). Koekappaleet kiinnitettiin niiden runkokappaleisiin (osiin 12 ja 30, Liite 7) kuvassa 27 olevilla ruuveilla (osilla 33, Liite 7) ja kumilevyillä (osilla 32, Liite 7). Kiinnitysosien muodostamien eri kiinnitysratkaisujen joukosta oli tarkoitus valita optimaalinen nappikiinnitys pyörähdyskappaleeseen. Nappeja valmistettiin ulkohalkaisijaltaan joko 25 mm tai 24 mm. Ulkohalkaisijaltaan pienemmän napin ja pyörähdyskappaleen upotukseen väliin suunniteltiin o-rengastiivistys mahdollisesti vähentämään tiivistepintojen haitallista kulumista. Vastinlevyn ja painekappaleen väliin asetettiin o-rengastiivistys (osa 31, Liite 7) valesuodatin välttämiseksi. Laitteistossa nappien lukumäärä muutettiin ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna kahdesta kolmeen, jonka vuoksi pyörähdyskappaleen ja painekappaleen ulkohalkaisijat kasvatettiin 80 mm:stä 120 mm:iin.



Kuva 27. Koekappaleet ja niiden kiinnitys- sekä tiivistysosat valokuvattuna.

Koekappaleet kohdistettiin toisiinsa pyörähdyskappaleessa olevan keskitapin avulla, joka laakeroitiin painekappaleeseen. Keskitapin pituutta ja halkaisijaa kasvatettiin ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna tukevamman rakenteen saamiseksi. Liukulaakerina käytettiin 1 mm paksuista Pampus -laakeriliuskaa (osaa 34, Liite 7), joka mahdollisti

pyörivän sekä pystysuuntaisen liikkeen runkokappaleiden välillä. Paine-kappaleeseen kiinnitettiin kuvassa 28 näkyvä rakenneteräksestä valmistettu tukilevy (osa 16, Liite 7) kahdella vaarnaruuvilla (osilla 17, Liite 7) ja mutterilla (osilla 27, Liite 7). Tukilevyn kierrereikiin kiinnitettiin kaksi messingistä puslaa (osaa 19, Liite 7). Puslien sisäreiät mitoitettiin samankeskisiksi ja välyksettömiksi laitteiston rungossa oleviin ohjaustankoihin, mikä mahdollisti painekappaleen paikallaan pysymisen operoinnin aikana. Ohjaustankojen ja puslien välisten kosketuspintojen ajoittainen voitelu öljyllä mahdollisti painekappaleen herkemmän liikkumisen pystysuunnassa. Pyörähdyskappale kiinnitettiin ensimmäisen prototyypin tapaan toimilaitteeseen puristus- ja kiilaliitoksella (osalla 4, Liite 7). Paine-kappaleen ja tukilevyn väliin kiinnitettiin vuodonmittauksen instrumenteille tarkoitettu alumiininen vuodonmittauslevy (osa 20, Liite 7).



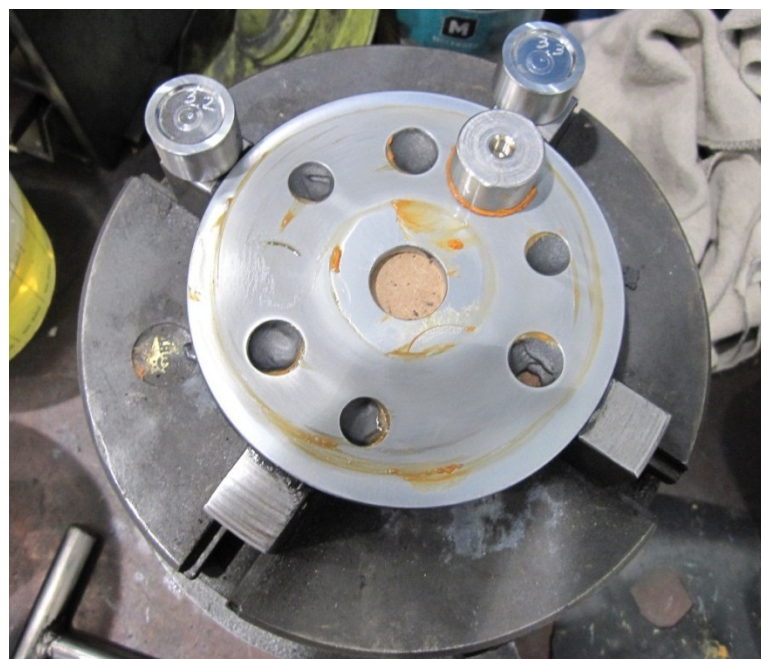
Kuva 28. Koekappaleiden runkokappaleiden kiinnitys laitteistoon.

Koekappaleiden valmistuksen jälkeen niiden tiivistepinnat pinnoitettiin 60 μm vahvuisella kovakromikerroksella. Pinnoitetut tiivistepinnat läpättiin parhaan mahdollisen tiivistepintojen välisen kontaktipinnan mahdollistamiseksi. Vastinlevyt läpättiin aluksi hiiliteräksestä valmistetulla läppäysnapilla käyttäen karbidipulverin ja öljyn seosta kuvan 29 kaltaisesti. Läppäys suoritettiin läppäyspenkissä, jossa vastinlevyn ja läppäysnapin pinnat asetettiin toisiaan vasten samalla pyörittämällä kappaleita erisuuntiin.



Kuva 29. Ennen laitteiston käyttöönottotestejä tehty vastinlevyjen karkealäppäys läppäyspenkissä läppäysnapin avulla.

Vastinlevyjen karkean läppäyksen jälkeen napit läpättiin vastinlevyihin hienorakeisella timanttitahnalla. Nappien läppäys suoritettiin asettamalla tiivistepinnat keskenään vastakkain samalla pyörittämällä läppäyspenkissä koekappaleita erisuuntiin karkean läppäyksen tapaan. Nappien pyörimisradan säteenä pidettiin samaa kuin vastinlevyn virtausaukkojen sädettä kuten kuvassa 30. Läppäämistä suoritettiin niin pitkään kunnes tiivistepinnat olivat täydellisesti läppäytyneet.



Kuva 30. Karkeanläppäyksen jälkeen tehty nappien hienoläppäys vastinlevyyn timanttitahnalla tasaisen kontaktin saamiseksi tiivistepintojen välillä.

11.3.4 Pintapaineen muodostaminen

Tiivistepintojen välinen pintapaine säädettiin kuvassa 26 olevaa rattia (osaa 23, Liite 7) kiertämällä. Rattiin liitettiin hienokierteinen vaarnaruuvi (osa 14, Liite 7) ja laitteiston ylimpään runkolevyyn (osaan 7, Liite 7) tehtiin vaarnaruuville kierrereikä. Hienokierre valittiin pintapaineen säädön herkkyyden takaamiseksi. Vaarnaruuvin alapäähän liitettiin rakenneteräksestä valmistettu holkki (osa 15, Liite 7), jolla ohjattiin puristusvoima voima-anturille (osalle 6, Liite 7). Voima-anturin molemmille puolille asetettiin pallomaisien pinnan omaavat väliholkki (osa 24, Liite 7) ja välipalikka (osa 5, Liite 7) tiivistepintojen tasaisen pintapaineen mahdollistamiseksi. Holkkiin (osaan 15, Liite 7) liimattiin itsevoiteleva painelaakeri (osa 11, Liite 7), jonka liukupinta väliholkkia (osaa 24, Liite 7) vasten oli öljyllä kyllästetty huokoista asetaalimuovia. Voima-anturina käytettiin samaa kuin ensimmäisessä prototyypissä, joten tiivistepintojen välinen pintapaineen mittaustapa voitiin näin säilyttää samana. Laitteiston käyttäjän turvallisuuden lisäämiseksi holkin (osan 15, Liite 7) ja ylimmän runkolevyn (osan 7, Liite 7) välissä käytettiin kuusiomutteria (osaa 22, Liite 7). Kuusiomutteri kiristettiin ylimpään runkolevyyn jäämäkästi halutun pintapaineen asettamisen jälkeen, jolla varmistettiin pintapaineen muuttumattomuus vuodonmittauksen aikana. Lisäksi laitteiston alimmaisen runkolevyn (osan 13, Liite 7) ja lavan väliin asetettiin runkolevyn ulkohalkaisijan levyinen kumimatto kitkan lisäämiseksi. Kitkan lisäämisellä mahdollistettiin laitteiston paikallaan pysyminen muodostaessa suuria pintapaineita rattia kiertämällä.

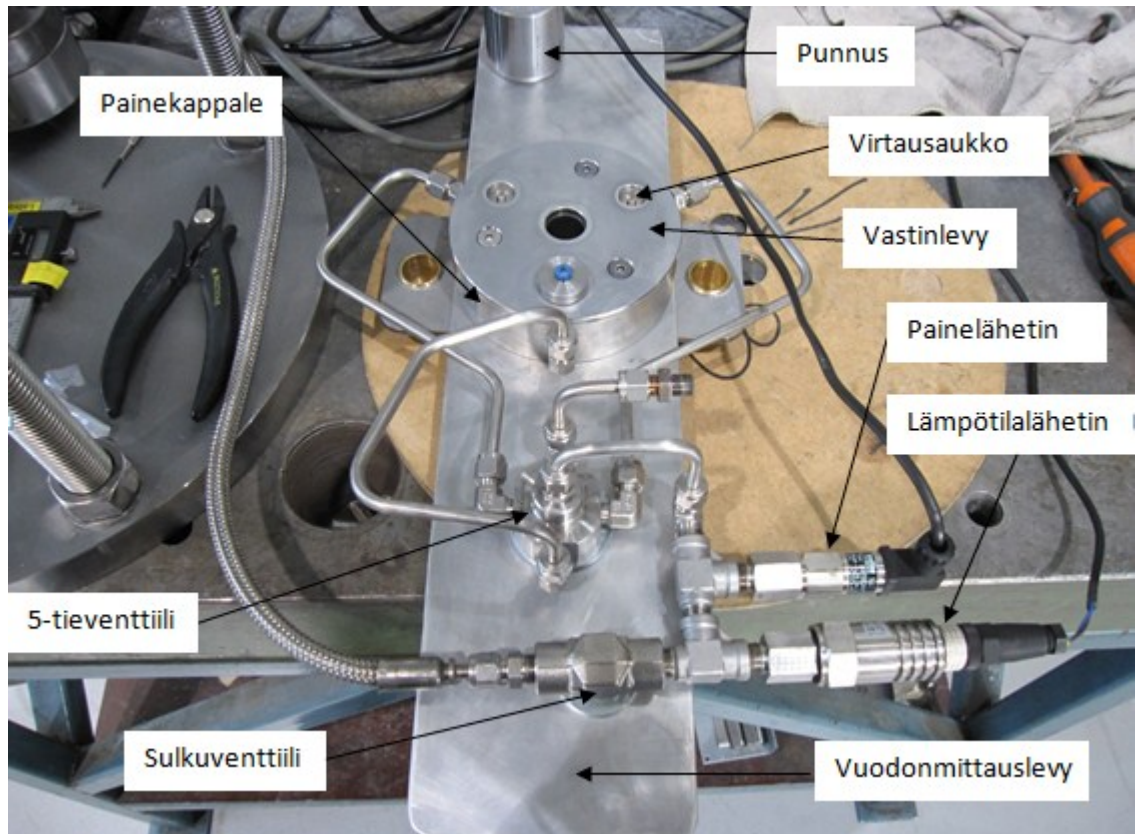
11.3.5 Operointi

Operoinnin toimilaitteena käytettiin ensimmäisen prototyypin tapaan Neleksen pneumaattista kaksoiskalvotoimilaitetta EC-10, jonka johdosta sen säätöön rakennettu laitteisto voitiin säilyttää samana. Tiivistestilaitteiston konstruktion muuttuessa kolmen napin systeemiin toimilaitteen iskunpituutta säädettiin sylinterin päädyissä olevilla rajoitusruuveilla, niin että pyörähdyskappaleen kääntymiskulma oli välillä 0-35°. Toiseksi alimman runkolevyn (osan 1, Liite 7) ja toimilaitteen välissä oleva liukulaakerointi korvattiin suurempia kuormituksia kestäväillä kahdella itsevoitelevalla painelaakerilla (osalla 11, Liite 7), joten ensimmäisessä prototyypissä käytetty aksiaalilaakereita samankeskisinä pitänyt ohjausholkki voitiin jättää pois.

11.3.6 Vuodonmittaus

Kaasuväliaineen vuodonmittaus toteutettiin ensimmäisen prototyypin tapaan paine-eromenetelmällä. Vuodonmittauksen instrumentit (osat 26, Liite 7) kiinnitettiin kuvan 31 kaltaisesti vuodonmittauslevyyn (osaan 20, Liite 7), joka liitettiin painekappaleeseen (osaan 12, Liite 7). Vuodonmittauksen instrumenttien vastapainoksi vuodonmittauslevyn toiseen päähän kiinnitettiin punnus (osa 25, Liite 7) tasapainottamaan painoja-kaumaa ja siten edesauttamaan vuodonmittaussysteemin asennusta laitteistoon. Vuodonmittauksessa väliaineena käytettiin kaasupullosta saatua synteettistä ilmaa, joka johdettiin korkeapaineletkua pitkin systeemin painetilaan. Kaasupullo ja systeemin painetila erotettiin toisistaan Swagelokin sulkukäyttöön tarkoitettulla neulaventtiilillä. Sulkuventtiiliin liitettiin kaksi t-haaraa, joihin painelähetin sekä lämpötilalähetin liitettiin. Väliaineen painetta mitattiin mittausalueeltaan 0-100 bar olevalla Trafagin venymäliuska NAT -painelähettimellä sekä lämpötilaa mittausalueeltaan 0-100 °C olevalla Muellerin MKTS Pt100 -lämpötilalähettimellä.

T-haarasta väliaine johdettiin Swagelokin putkiliittimiin yhdistetyn ulkohalkaisijaltaan 6 mm teräsputken kautta Swagelokin 5-tie palloventtiiliin, jossa oli yksi tuloyhde ja neljä lähtöyhdettä. 5-tieventtiilissä oli auki kerrallaan vain yksi lähtöyhde, jota vaihtamalla väliaine voitiin ohjata halutuille koekappaleille. Yksi lähtöyhteistä toimi kalibrointiyhteenä, joka oli koekappaleiden tiiviystestien aikana tulpattu hitsatulla pääteliittimellä. Kalibrointiyhteen tulpan tilalle voidaan jatkossa myös asentaa pikaliitin painemittaria varten, jolla tarkastetaan aika-ajoin painelähtetimen luotettavuus sekä laitteiston tiiviys mahdollisten valevuotojen havaitsemiseksi. Ensimmäisen prototyypin tapaan paine- ja lämpötilalähtetimen ulostulosignaali johdettiin NI 9203 -mittauskortin kautta tietokoneelle, jossa LabVIEW -pohjaisella ohjelmalla kaasun paineen, p , ja lämpötilan, T , dataa ajanmuutoksen, Δt , suhteen voitiin seurata ja tallentaa mittauksen aikana. Vuodonmittauksesta saatu data muutettiin vuotoarvoksi kaavoja 4 ja 5 käyttämällä. 5-tieventtiilistä lähtevät systeemin painetilan teräsputket painekappaleeseen mitoitettiin samanpituisiksi, jotta väliaineen tilavuus V_k jokaisessa eri painetilassa on sama vertailtaessa koekappaleiden keskinäisiä vuotoarvoja. Vuotoarvojen määrittämisessä kaasun tilavuutena käytettiin laskennallista arviota $V_k = 8 \text{ cm}^3$, koska painetilan tilavuuden koellinen mittaaminen osoittautui haasteelliseksi.



Kuva 31. Vuodonmittaussysteemin rakenne esitettynä alhaaltapäin kuvattuna ja sen tärkeimmät osat nuolin merkittynä.

12 Dynaamisen tiiviystestilaitteiston käyttöönottestit

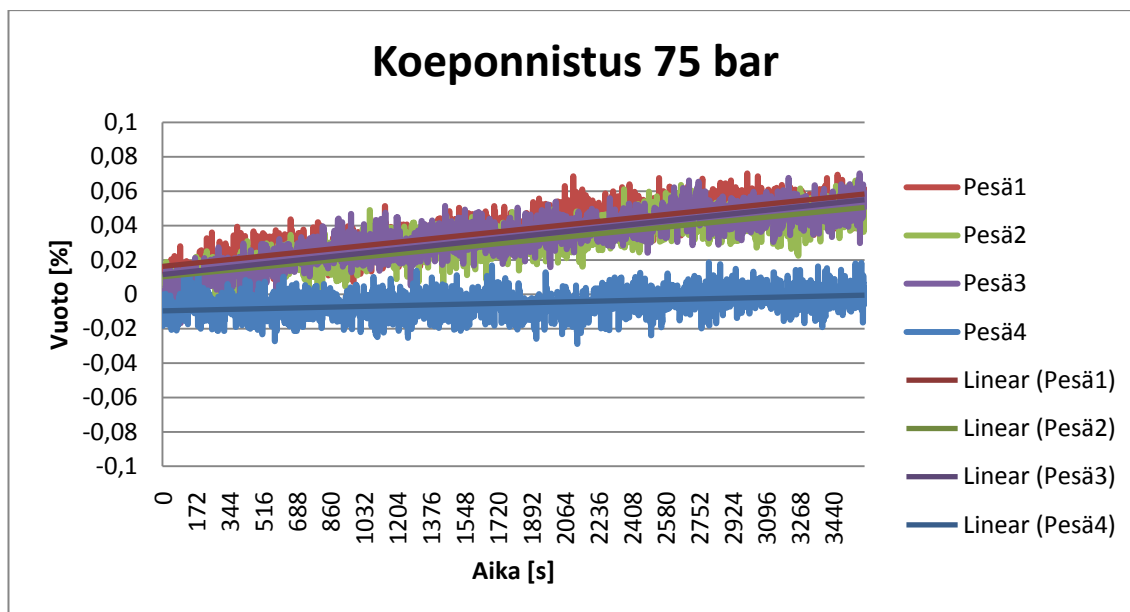
12.1 Laitteiston ominaisuudet ja rajoitukset

Laitteistossa väliaineena tulee käyttää ideaalikaasunlakeja noudattavaa kaasua, jonka paineen käyttöalueen on oltava välillä 0-100 bar. Laitteistolla voidaan suorittaa mittauksia ympäristön lämpötilan ollessa välillä 0-70 °C. Toimilaitteen ohjaukseen käytetyn paineilman syöttöpaineen tulee olla välillä 0-8 bar ja koekappaleiden tiivistepintojen maksimi puristusvoima on 50 kN.

12.2 Laitteiston koeponnistus

Laitteistolle suoritettiin koeponnistus synteettisellä ilmalla vuodonmittaussysteemin tiiviyn määrittämiseksi. Riittävällä vuodonmittaussysteemin tiiviydellä osoitettiin sen mahdollistavan luotettavat vuototulokset. Lisäksi koeponnistuksella todettiin laitteiston olevan turvallinen käyttäjälleen. Koeponnistus suoritettiin jokaiselle systeemin painetilalle eli pesälle sekä kalibrointiyhteelle. Koeponnistuksen ajaksi mitattavan pesän virtausaukko vastinlevyssä tulpattiin kuvan 31 mukaisesti. Koeponnistus suoritettiin huoneenlämpötilassa käyttämällä väliaineen paineena 75 bar, joka on 1,5-kertainen laitteistolta vaadittuun maksimi paineenkestokykyyn nähden. Systeemin pesän paineistuksen jälkeen sulkuventtiili suljettiin ja sen tulopuolen paine purettiin vuodonmittausta varten.

Laitteiston pesien koeponnistuksen vuototulokset on esitetty kuvassa 32. Koeponnistuksessa jokaisen pesän vuotoa mitattiin yhden tunnin ajan, jonka jälkeen saatuja vuototuloksia verrattiin keskenään. Pesät 1-3 ovat painekappaleeseen johdettuja painetiloja ja pesä 4 on kalibrointiyhde. Pesä 4 on lähes vuotamaton, joten kalibrointiyhdettä voidaan pitää täysin tiiviinä. Puolestaan pesät 1-3 vuotivat kaasun lähtömassasta noin 0,05 % tunnin aikana. Pesien 1-3 vuotamisen aiheutti todennäköisesti vastinlevyn virtausaukos-
sa käytetty tulppa, koska vuotoarvot ovat keskenään samansuuruisia. Mahdollisesti va-
levuoto on voinut muodostua tulpan ja vastinlevyn tiivistykseen käytettyjen o-renkaiden
välistä. Kuitenkin pesien 1-3 vuotoarvot ovat niin pieniä, että vuodonmittaussysteemi
voitiin todeta riittävän tiiviiksi ja siten luotettavaksi vuodonmittaukseen.



Kuva 32. Vuodonmittaussysteemin pesien 1-4 koeponnistuksen vuototulokset. Koeponnistus suoritettiin synteettisellä ilmalla 75 bar paineessa. Vuoto (%) on esitetty prosentteina väliaineen lähtömassasta ajan (s) suhteen, ja suorat kuvaavat lineaarista sovitusta datapisteisiin.

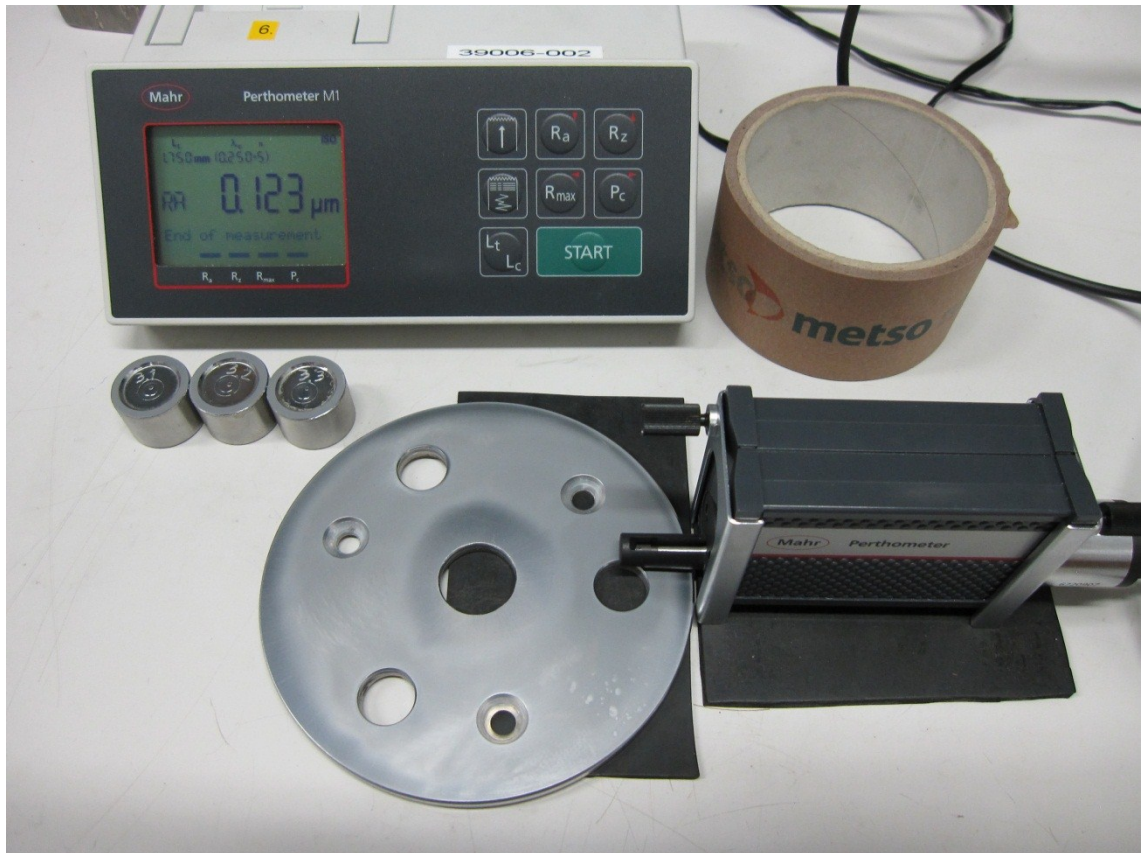
12.3 Käyttöönottestiohjelma

Hyväksytysti suoritettua koeponnistuksen jälkeen voitiin suorittaa varsinaiset laitteiston käyttöönottestit. Käyttöönottestien tarkoituksena oli tarkastella vuototulosten luotettavuutta vertaamalla keskenään koekappaleiden tiivistepintojen välisiä vuotomääriä samansuuruisia tiivistekijöitä käyttämällä. Vuototulosten luotettavuutta tarkasteltiin tekemällä toistettavuustestejä, joita ennen valittiin kokeellisesti ideaalisin nappikiinnityskonsepti. Lisäksi vuotoarvoon vaikuttavien muuttuvien tiivistekijöiden avulla tutkittiin laitteiston toimivuutta. Käyttöönottesteissä muuttuvina tiivistekijöinä käytettiin tiivistepintojen pinnankarheutta, pintapainetta, väliaineen painetta ja operointia. Käyttöönottestien aikana tehtiin myös käytäntöön perustuvaa tarkastelua laitteiston toimivuudesta.

12.4 Käyttöönottestien valmistelut

Pinnoitettujen koekappaleiden tiivistepintojen reunoihin kerääntyi viisteistä huolimatta kromipartaa, jotka hiottiin pois ennen tiivistepintojen läppäämistä. Tiivistepinnat läpätettiin vastaavanlaisesti pyrkien samaan pinnankarheuteen mitoiltaan samanlaisten koe-

kappaleiden välillä. Tiivistepintojen pinnankarheuksien R_a - ja R_z -arvot mitattiin kuvan 33 mukaisella pinnankarheusmittarilla.



Kuva 33. Koekappaleiden tiivistepintojen pinnankarheudet mittaaminen kuvassa esitellyllä mittauslaitteistolla, joka koostuu erillisistä näyttö- ja anturiyksiköistä.

Nappien korkeus mitattiin työntömitalla johtuen niiden keskinäisistä korkeuseroista. Nappien paikat pyörähdyskappaleen upotuksissa valittiin korkeutensa perusteella niin että nappien tiivistepinnat olisivat samassa tasossa. Tiivistepintojen tulee olla samassa tasossa, jotta koekappaleiden väliset kuormitukset olisivat yhtä suuret. Nappiupotukset numeroitiin pyörähdyskappaleeseen stanssaamalla. Pyörähdyskappaleen numeroitujen upotuksien syvyydet ovat:

1. 15,011 mm
2. 15,039 mm
3. 15,030 mm.

Koekappaleiden pinnankarheuden ja korkeuden mittaamisen jälkeen osat numeroitiin stanssaamalla sekaantumisen välttämiseksi. Ennen käyttöönottotestejä laitteiston antureille suoritettiin kalibrointi. Voima-anturin, lämpötilalähettimen ja painelähettimen ulostulosignaali saatiin jännitteenä, jolle määritettiin korjauskertoimet. Korjauskertoimien avulla ulostulosignaali voitiin muuttaa halutuksi mittaussuureeksi. Mittalaitteiden kalibroinnissa mittauksen ero mittanormaaliin oli lineaarinen ja painelähettimen kalibraattorina käytettiin Beamex MC3:sta.

Käyttöönottotestejä varten ympäristön lämpötilamuutosten kompensoimiseksi laitteistolle rakennettiin eristekaappi. Eristekaappi rakennettiin 50 mm paksuisesta puolipontatusta lämmöneristelevystä. Eristekaapin tarkoituksena oli asettaa se vuodonmittauksen ajaksi laitteiston päälle, jolloin lämpötilavaihtelut mittauksen aikana olisivat mahdollisimman pienet.

13 Testitulokset

Nappien kiinnityskonseptin valinnassa tarkasteltiin viittä erilaista tapaa. Nappikiinnitys vaihtoehdot pyörähdyskappaleeseen olivat

- 1 kumilevy napin pohjassa,
- 2 kumilevyä napin pohjassa,
- 3 kumilevyä napin pohjassa,
- 3 kumilevyä napin pohjassa + ruuvikiinnitys ja
- ruuvikiinnitys.

Nappikiinnitystestissä käytettiin tiivistepintojen pintapaineena 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman paineena 20 bar. Yksittäisen tiiviystestin kesto aika oli minuutti ja tiiviystestit suoritettiin kahteen kertaan. Nappikiinnitystestin vuototulokset ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Nappien korkeudet (mm) ja nappien sekä vastinlevyn pinnankarheudet (R_a , R_z ; μm) taulukoituna. Lisäksi nappien eri kiinnitysvaihtojen tiiviystestit vuotona (ml/min) ilmoitettuna.

Nappi					Vastinlevy					Tiiviystesti		
Osa	Mittaus	Korkeus	R_a	R_z	Osa	Virtausaukko	Mittaus	R_a	R_z	Nappikiinnitys	Vuoto [ml/min]	Vuoto [ml/min]
Osa 1.4	1	17,17	0,047	0,51	Osa 4.4	1	1	0,28	1,89	1xkumilevy	1,06	1,03
	2	17,17	0,045	0,38			2	0,33	2,02	2xkumilevy	0,50	0,45
	3	17,16	0,046	0,43			3	0,28	1,94	3xkumilevy	0,41	0,42
	4	17,17	0,048	0,39			4	0,26	1,72	3xkumilevy+ruuvi	14,35	12,79
Osa 1.5	1	17,19	0,045	0,45		2	1	0,28	1,69	1xkumilevy	0,36	0,35
	2	17,2	0,052	0,38			2	0,28	1,96	2xkumilevy	0,34	0,36
	3	17,19	0,045	0,35			3	0,25	1,49	3xkumilevy	0,30	0,33
	4	17,19	0,038	0,27			4	0,24	1,46	3xkumilevy+ruuvi	0,26	0,30
Osa 1.6	1	17,17	0,043	0,34		3	1	0,25	1,64	1xkumilevy	0,78	0,47
	2	17,18	0,04	0,3			2	0,25	1,69	2xkumilevy	0,36	0,39
	3	17,19	0,04	0,29			3	0,27	1,74	3xkumilevy	0,30	0,40
	4	17,17	0,043	0,31			4	0,24	1,58	3xkumilevy+ruuvi	0,58	0,67
										ruuvi	0,86	0,92

Saatujen vuototulosten perusteella valittiin ideaalisin napin kiinnitystapa pyörähdyskappaleeseen. Kiinnitysvaihtoehtojen vuototuloksia verrattiin toisiinsa laskemalla jokaiselle kiinnitystavalle keskiarvo vuotoarvoista. Keskiarvon lisäksi laskettiin keskihajonta jokaiselle kiinnitystavalle, jolla määritettiin vuotoarvojen ryhmittäminen keskiarvonsa ympärille. Ideaalein nappikiinnitysvaihtoehto valittiin keskihajonnan arvon mukaan.

Mitä pienempi on vuotoarvojen keskihajonta, sitä lähemmäs keskiarvoa ne ovat ryhmityneet, jonka perusteella saadaan luotettavimmat vuototulokset. Taulukossa 7 on esitetty nappikiinnitysvaihtoehtojen vuotoarvojen tunnusluvut.

Taulukko 7. Nappienkiinnitystestien vuotojen keskiarvot (ml/min), keskihajonnat (ml/min) sekä vaihteluvälit (ml/min) taulukoituna.

Nappikiinnitys	Vuodon keskiarvo [ml/min]	Vuodon keskihajonta [ml/min]	Vuodon vaihteluväli [ml/min]
1xkumilevy	0,67	0,33	0,71
2xkumilevy	0,40	0,06	0,16
3xkumilevy	0,36	0,06	0,13
3xkumilevy+ruuvi	4,83	6,80	14,10
ruuvi	4,95	6,45	12,69

Nappikiinnitystestien vuototulosten perusteella kumilevyjen lisääminen napin pohjaan tasoittaa koekappaleiden keskinäisiä vuototuloksia. Puolestaan napin ruuvikiinnitys aiheuttaa suurta vaihtelua vuototuloksissa. Kahden ja kolmen kumilevyn kiinnityksen vuototuloksien välillä ei ole merkittävää eroa. Kuitenkin kumilevyjen lisääminen napin pohjaan nostaa nappia pyörähdyskappaleen upotuksesta, jolla voi olla epäedullinen vaikutus tiivistepinnan kulumiseen sitä operoidessa. Täten valitaan mieluummin kahden kumilevyn nappikiinnitystapa pyörähdyskappaleen.

Valittua kahden kumilevyn nappikiinnitystapaa testattiin edelleen vaihtamalla vastinlevyn virtausaukkojen paikoitusta nappien suhteen, jonka avulla tarkasteltiin yksittäisten tiivistepintojen vaikutusta vuototuloksiin. Koekappaleiden paikoitustestissä käytettiin tiivistepintojen pintapaineena 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman paineena 20 bar. Yksittäisen tiiviystestin kesto aika oli minuutti ja tiiviystestit suoritettiin kahteen kertaan. Koekappaleiden paikoitustestien vuototulokset ovat esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Paikoitustestien vuototulokset esitettynä koekappaleiden vuotoarvona (ml/min).

Nappi	Vastinlevy		Tiiviystesti		
Osa	Osa	Virtausaukko	Nappikiinnitys	Vuoto [ml/min]	Vuoto [ml/min]
Osa 1.4	Osa 4.4	1	2xkumilevy	0,50	0,45
		2	2xkumilevy	0,25	0,28
		3	2xkumilevy	0,34	0,35
Osa 1.5		1	2xkumilevy	0,38	0,46
		2	2xkumilevy	0,34	0,36
		3	2xkumilevy	0,36	0,37
Osa 1.6		1	2xkumilevy	0,57	0,44
		2	2xkumilevy	0,24	0,27
		3	2xkumilevy	0,36	0,39

Koekappaleiden paikoitustestin vuototuloksista laskettiin jokaiselle napin ja vastinlevyn virtausaukon tiivistepinnan vuotoarvoille keskiarvo. Nappikiinnitystestin mukaisesti keskiarvon lisäksi laskettiin tiivistepintojen vuotoarvojen keskihajonta. Taulukossa 9 on esitetty koekappaleiden paikoitustestin vuotoarvojen tunnusluvut.

Taulukko 9. Paikoitustestin nappien ja vastinlevyn virtausaukkojen tiivistepintojen vuotojen keskiarvot (ml/min) ja keskihajonnat (ml/min) taulukoituna.

Nappi			Vastinlevy		
Osa	Vuodon keskiarvo [ml/min]	Vuodon keskihajonta [ml/min]	Virtausaukko	Vuodon keskiarvo [ml/min]	Vuodon keskihajonta [ml/min]
Osa 1.4	0,36	0,10	1	0,47	0,06
Osa 1.5	0,38	0,04	2	0,29	0,05
Osa 1.6	0,38	0,12	3	0,36	0,02

Vuotoarvojen tunnuslukujen perusteella keskinäiset nappien vuotojen keskiarvot ovat lähellä toisiaan. Puolestaan keskinäisissä vastinlevyn virtausaukkojen vuotojen keskiarvoissa on eroja, minkä perusteella virtausaukkojen tiivistepinnoissa on mahdollisesti vuotoon vaikuttavia geometrisia virheitä. Geometriset virheet tiivistepinnoilla vaikuttavat epäsuotuisasti vuotoarvojen vertailun luotettavuuteen eri koekappaleiden välillä. Vastinlevyn 4.4 virtausaukon 3 vuotoarvojen pienen keskihajonnan perusteella vuotoarvot ovat lähellä toisiaan riippumatta siitä mikä nappi muodostaa sen kanssa tiivistepintaparin. Puolestaan napeista 1.5 osoittaa muodostavan vuotoarvojen keskihajonnan mukaan luotettavimman tiivistepinnan vuodonmittaukseen.

Vuototulosten luotettavuutta tarkasteltiin jatkamalla tiiviystestejä samalla nappien ja virtausaukkojen paikoituksella kuin nappikiinnitystestissä. Toistettavuustestillä pyrittiin osoittamaan, että vuotoarvojen pitäisi pysyä samoina koekappaleiden uudelleen asennuksen jälkeen. Toistettavuustestissä vuotomittauksen välillä koekappaleet irrotettiin ja asennettiin uudelleen laitteistoon. Toistettavuustestissä käytettiin tiivistepintojen pintapaineena 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman paineena 20 bar. Yksittäisen tiiviystestin kesto aika oli minuutti ja tiiviystestit suoritettiin kolmeen kertaan, kun kaksi ensimmäistä vuotomittauksarjaa oli suoritettu jo nappikiinnitystestissä. Toistettavuustestin vuototulokset ovat esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Toistettavuustestin vuototulokset esitettynä vuotoarvoina (ml/min).

Nappi		Vastinlevy	Tiiviystesti				
Osa	Osa	Virtausaukko	Vuoto 1 [ml/min]	Vuoto 2 [ml/min]	Vuoto 3 [ml/min]	Vuoto 4 [ml/min]	Vuoto 5 [ml/min]
Osa 1.4	Osa 4.4	1	0,50	0,45	0,31	0,32	0,41
Osa 1.5		2	0,34	0,36	0,24	0,26	0,30
Osa 1.6		3	0,36	0,39	0,26	0,31	0,37

Toistettavuustestissä epäonnistuttiin aloitettaessa vuotomittausarjojen 3-5 suoritus liian aikaisin laitteiston vuodon mittauslaitteiden päälle kytkemisestä. Tämän vuoksi mittalaitteet eivät olleet lämmenneet riittävästi, joten mittausvirhettä pääsi syntymään vuototuloksiin. Kuitenkin jo viidennessä vuotomittausarjassa vuotoarvot alkoivat tasoittua lähelle nappikiinnitystestissä suoritettuja vuototuloksia nähden. Muodostuneesta mittausvirheestä huolimatta jokaisen vuotomittausarjan tiivistepintaparien vuotoarvojen suhteet pysyivät likimäärin samoina, minkä perusteella vuodonmittaamista voidaan pitää luotettavana koekappaleiden uudelleen asennuksen jälkeen. Toistettavuustestin vuototuloksien perusteella laskettiin satunnaisesta mittausepävarmuudesta muodostuva vuotoarvojen luottamusväli sekä virhemarginaali. Tiiviystestissä vuotojen odotusarvon oletetaan muodostuvan normaalijakautuneesti. Vuotoarvojen luottamusväli lasketaan käyttämällä 95 %:n luottamustasoa. Vuotojen keskiarvojen luottamusväli ja virhemarginaali on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Vuotojen otoskoko (n ; kpl), keskiarvo (\bar{x} ; ml/min), keskihajonta (s ; ml/min) sekä luottamustaso ja sen perusteella saatu t -jakauman luottamuskertoimet ($\pm t_{0,025}$) taulukoituna. Lisäksi esitettynä toistettavuustestin vuotoarvojen keskiarvojen luottamusväli (ml/min) ja virhemarginaali (%).

Vuotojen otoskoko (n)	15	kpl
Vuotojen keskiarvo (\bar{x})	0,3465	ml/min
Vuotojen keskihajonta (s)	0,0732	ml/min
Luottamustaso	0,95	
t -jakauman luottamuskertoimet ($\pm t_{0,025}$)	2,1448	
Vuotojen keskiarvojen luottamusväli $(\bar{x} \pm t_{0,025} \frac{s}{\sqrt{n}})$	0,3465 \pm 0,0405	ml/min
Vuotojen keskiarvojen virhemarginaali	± 12	%

Toistettavuustestin jälkeen tarkasteltiin tiivistepinnan pinnankarheuden muutoksen vaikutusta vuotoon. Koekappaleiden tiivistepinnat läpättiin toisiinsa karkeampirakeisella timanttitahnalla kuin ennen käyttöönottotestiä tehdyssä hienoläppäyksessä. Läppäyksen jälkeen tiivistepintojen pinnankarheudet mitattiin pinnankarheusmittarilla ja silmämää-

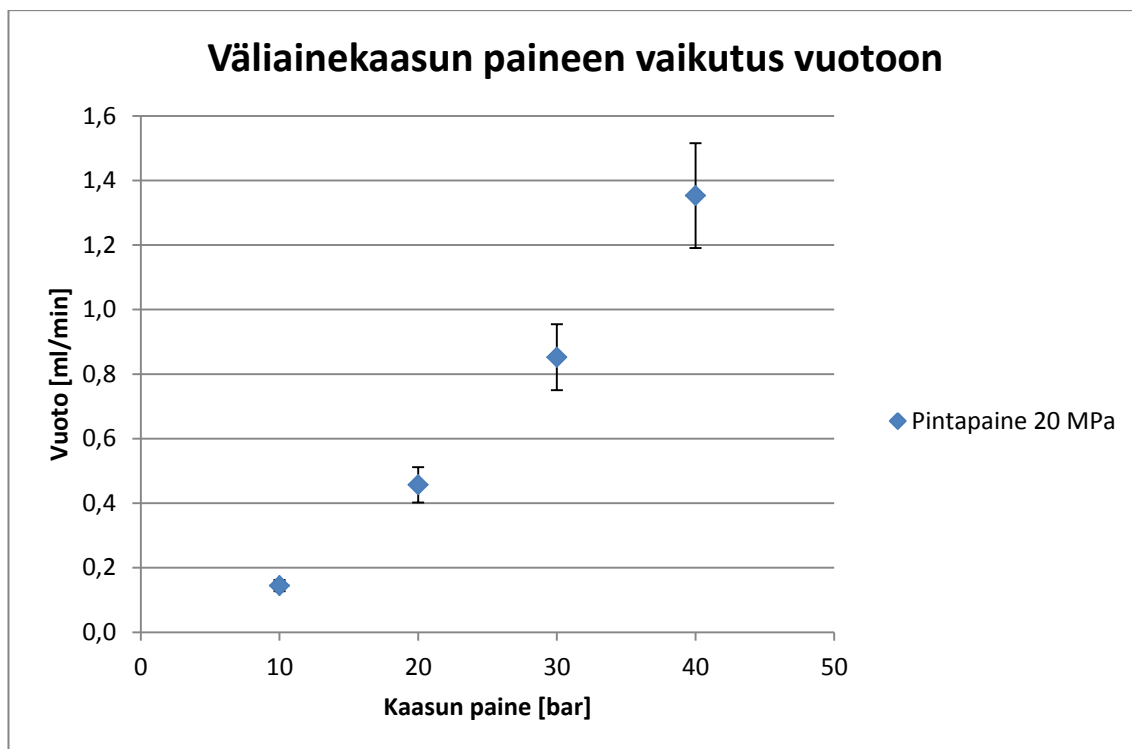
räisesti tiivistepintoihin tuli selvempiä naarmuja. Pinnankarheustestissä käytettiin tiivistepintojen pintapaineena 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman paineena 20 bar. Yksittäisen tiiviystestin kesto aika oli minuutti ja vuodonmittaus suoritettiin yhden kerran. Pinnankarheustestin vuototulokset ovat esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Nappien korkeudet (mm) ja nappien sekä vastinlevyn pinnankarheudet (R_a , R_z ; μm) taulukoituna. Lisäksi pinnankarheustestin tulokset vuotona (ml/min) ilmoitettuna.

Nappi					Vastinlevy					Tiiviystesti
Osa	Mittaus	Korkeus	R_a	R_z	Osa	Virtausaukko	Mittaus	R_a	R_z	Vuoto [ml/min]
Osa 1.4	1	17,17	0,048	0,46	Osa 4.4	1	1	0,209	1,56	0,59
	2	17,17	0,052	0,4			2	0,262	1,7	
	3	17,16	0,05	0,43			3	0,246	1,76	
	4	17,17	0,05	0,43			4	0,223	1,52	
Osa 1.5	1	17,19	0,044	0,45		2	1	0,234	1,47	0,44
	2	17,2	0,044	0,38			2	0,279	1,72	
	3	17,19	0,047	0,4			3	0,238	1,6	
	4	17,19	0,051	0,49			4	0,24	1,63	
Osa 1.6	1	17,17	0,039	0,31		3	1	0,238	1,67	0,91
	2	17,18	0,048	0,45			2	0,271	1,86	
	3	17,19	0,05	0,46			3	0,261	1,72	
	4	17,17	0,043	0,34			4	0,265	1,78	

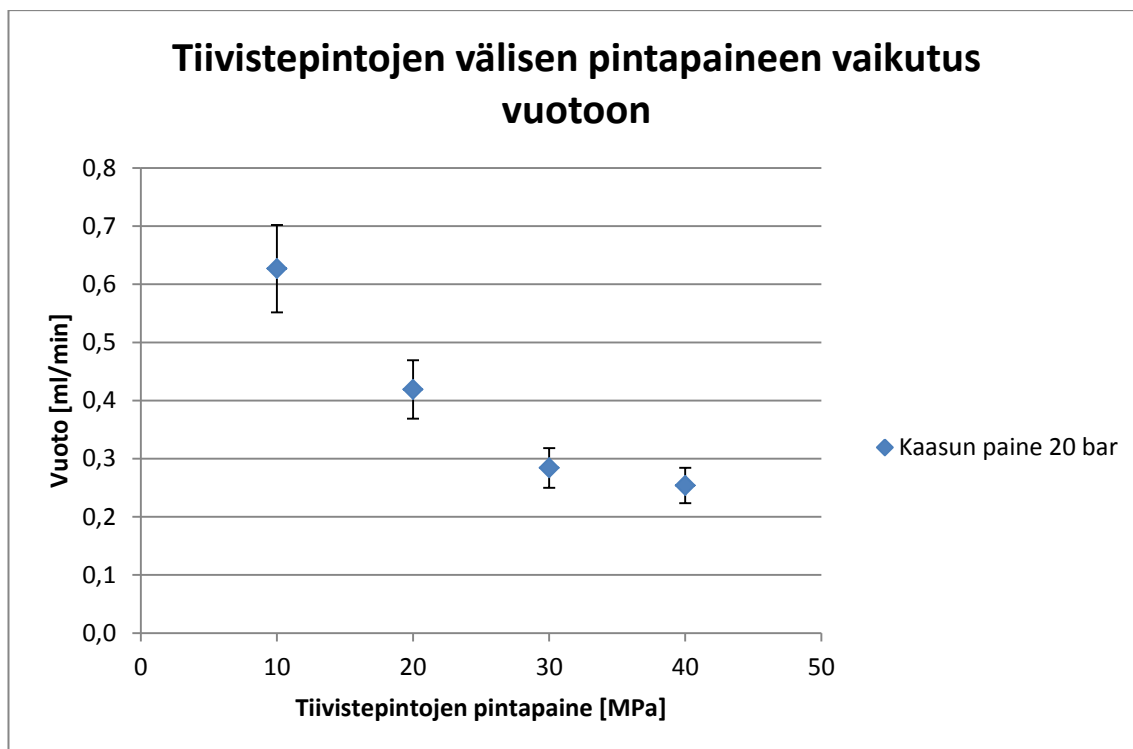
Pinnankarheustestissä läppäyksessä muodostuneet tiivistepintojen naarmut lisäsivät odotetusti koekappaleiden vuotoarvoja. Erityisesti napin 1.6 ja vastinlevyn 4.4 virtausaukon 3 välisen tiivistepinnan vuotoarvo kasvoi radikaalisti lähes kolminkertaisesti. Merkittävä vuotoarvon kasvu oli mahdollisesti seurausta läppäyksestä muodostuneiden laajojen vuotokanavien muodostumisesta tiivistepintojen välissä.

Tiivistepintojen välisen pintapaineen ja väliaineen kaasun paineen vaikutusta vuotoon tarkasteltiin napin 1.5 ja vastinlevyn 4.4 virtausaukon 2 välisellä tiivistepinnalla. Molemmista tarkasteluissa joko tiivistepinnan välinen pintapaine tai väliaineen kaasun paine pidettiin vakiona toisen ollessa muuttuvana tiiviystestijänä testin aikana. Molemmista testeissä yksittäisen tiiviystestin kesto aika oli 10 minuuttia. Kuvassa 34 on esitetty väliaineen synteettisen ilman paineen vaikutus vuotoarvoon. Testissä tiivistepintojen välisenä pintapaineena käytettiin 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman painetta muutettiin välillä 10–40 bar. Vuotomittauksia suoritettiin neljä pudottamalla väliaineen painetta mittaussarjan aikana.



Kuva 34. Väliainekaasun paineen vaikutus vuotoon. Vakio suuruksella tiivistepintojen välisellä pintapaineella (MPa) mitattiin tiivistepinnan välistä vuotoa (ml/min) synteettisen ilman paineen (bar) muutoksen suhteen. Virhepalkeissa on käytetty vuotoarvon virhemarginaalina ± 12 % toistettavuustestien perusteella saadun satunnaisen mittausepävarmuuden johdosta.

Kuvassa 35 on esitetty tiivistepintojen välisen pintapaineen vaikutus vuotoarvoon. Testissä väliaineen synteettisen ilman paineena käytettiin 20 bar ja tiivistepintojen välistä pintapainetta muutettiin välillä 10–40 MPa. Vuotomittauksia suoritettiin neljä vähentämällä tiivistepintojen välistä pintapainetta mittaussarjan aikana.



Kuva 35. Tiivistepintojen välisen pintapaineen (MPa) vaikutus vuotoon. Vakio suuruisella synteettisen ilman paineella (bar) mitattiin tiivistepinnan välistä vuotoa (ml/min) tiivistepintojen pintapaineen (MPa) muutoksen suhteen. Virhepalkeissa on käytetty vuotoarvon virhemarginaalina $\pm 12\%$ toistettavuustestien perusteella saadun satunnaisten mittausepävarmuuden johdosta.

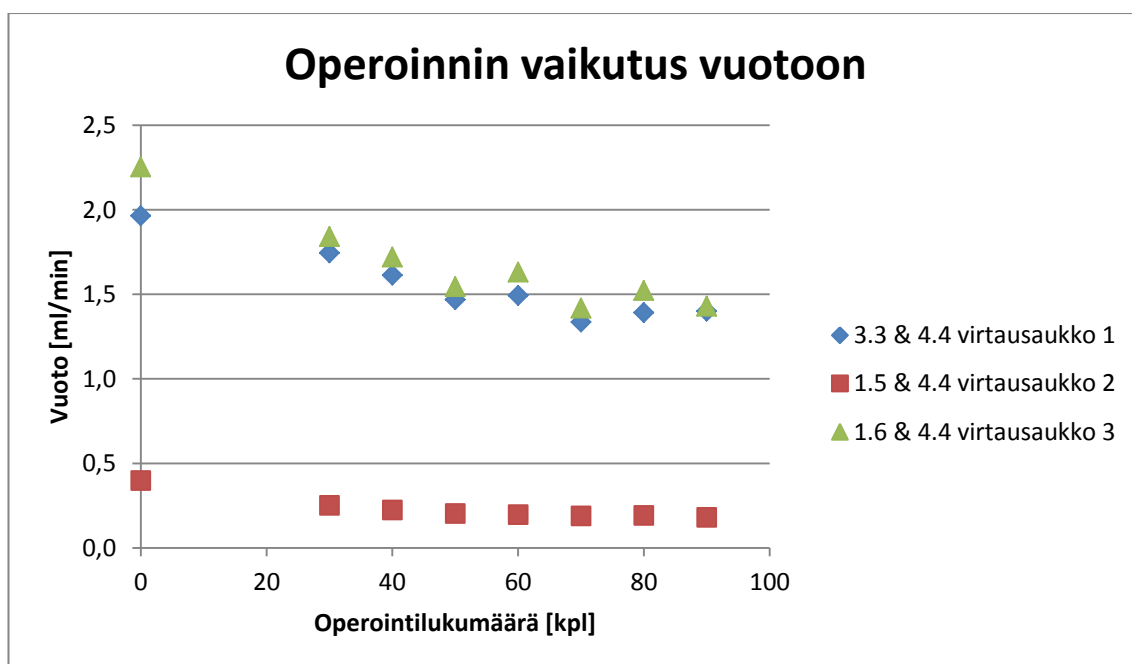
Testit tiivistepintojen välisen pintapaineen ja väliaine kaasun paineen vaikutuksesta vuotoon vastasivat ennestään oletettua vuodonkäyttäytymistä. Tiivistepintojen välistä pintapainetta lisättäessä vuotoarvo vähenee laskevan käyrän mukaisesti ja väliaine kaasun painetta lisättäessä vuotoarvo kasvaa nousevan käyrän mukaisesti.

Laitteiston viimeisen käyttöönottotestin tarkoituksena oli saada tietoa miten vuoto käyttäytyy operoinnin vaikutuksesta. Operointitestistä varten nappi 1.4 korvattiin ulkoalkaisijaltaan pienemmällä napilla 3.3. Nappi 3.3 kiinnitettiin pyörähdyskappaleeseen kahden kumilevyn lisäksi o-rengastiivistyksellä pyörähdyskappaleeseen. Vaihtoehtolla haluttiin tarkastella o-rengastiivistyksen vaikutusta tiivistepintojen haitalliseen kulumiseen ja siitä aiheutuvaan vuotoarvoon operoinnin jälkeen. Operointitestissä vuotomittaus suoritettiin tiivistepintojen operoinnin jälkeen ilman irrottamatta tiivistepintojen kontaktia. Testissä suoritettiin 7 koekappaleiden operointia ja 8 vuotomittaus sarjaa. Taulukossa 13 on esitetty nappien korkeudet, tiivistepintojen pinnankarheudet sekä operoinnin lukumäärät ja niissä käytetyt pintapaineet tiivistepintojen välillä. Vuotomittauksissa tiivistepintojen pintapaineena käytettiin 20 MPa ja väliaineen synteettisen ilman painee-

na 20 bar. Yksittäisen tiivistestien kesto-aika oli minuutti ja operointitestien vuototulokset ovat esitetty kuvassa 36.

Taulukko 13. Operointitestin nappien korkeudet (mm) sekä nappien ja vastinlevyn pinnankarheudet (R_a , R_z ; μm) taulukoituna. Lisäksi esitettynä operointikertojen lukumäärät (kpl) ja niissä käytetyt tiivistepintojen väliset pintapaineet (MPa). Testissä yhden operoinnin kesto-aika oli 10 sekuntia.

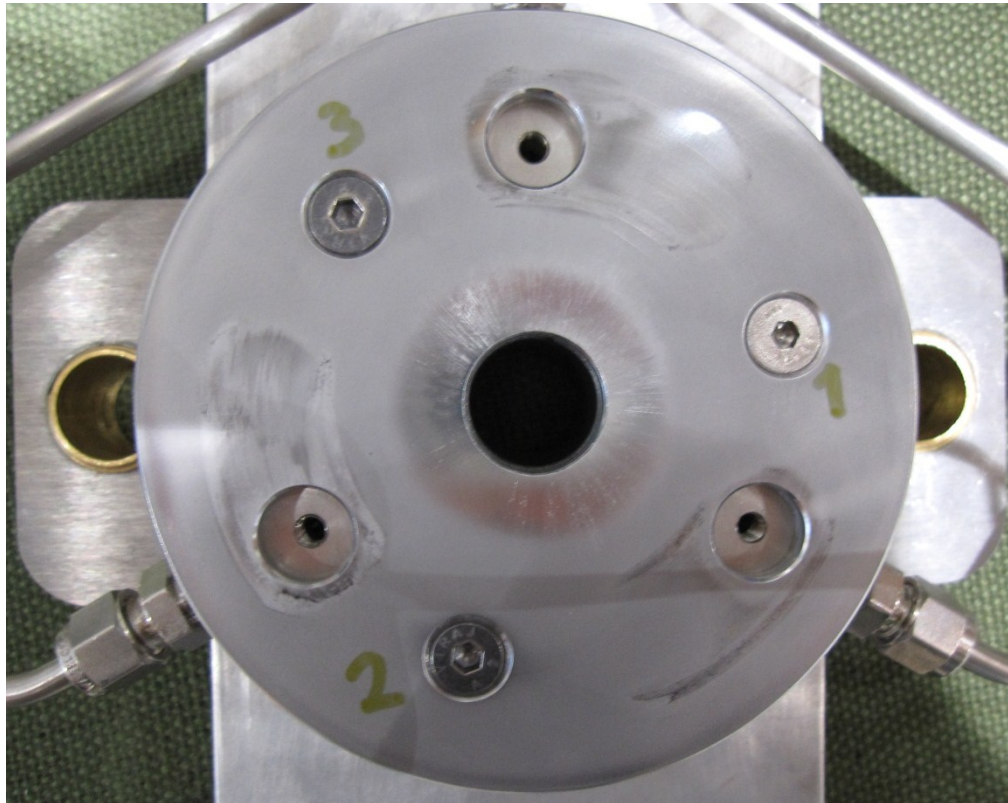
Nappi					Vastinlevy					Operointi						
Osa	Mittaus	Korkeus	R_a	R_z	Osa	Virtausaukko	Mittaus	R_a	R_z	30 kpl	10 kpl	10 kpl	10 kpl	10 kpl	10 kpl	10 kpl
3.3.	1	17,18	0,053	0,35	4.4.	1	1	0,209	1,56	0,55 MPa	1,1 MPa	1,1 MPa	1,4 MPa	2,8 MPa	2,8 MPa	2,8 MPa
	2	17,19	0,072	0,81			2	0,262	1,7							
	3	17,19	0,049	0,41			3	0,246	1,76							
	4	17,19	0,051	0,36			4	0,223	1,52							
1.5.	1	17,19	0,044	0,45	4.4.	2	5	0,234	1,47	0,35 MPa	0,7 MPa	0,7 MPa	0,9 MPa	1,8 MPa	1,8 MPa	1,8 MPa
	2	17,2	0,044	0,38			6	0,279	1,72							
	3	17,19	0,047	0,4			7	0,238	1,6							
	4	17,19	0,051	0,49			8	0,240	1,63							
1.6.	1	17,17	0,039	0,31	4.4.	3	9	0,238	1,67	0,35 MPa	0,7 MPa	0,7 MPa	0,9 MPa	1,8 MPa	1,8 MPa	1,8 MPa
	2	17,18	0,048	0,45			10	0,271	1,86							
	3	17,19	0,05	0,46			11	0,261	1,72							
	4	17,17	0,043	0,34			12	0,265	1,78							



Kuva 36. Operointitestin eri koekappaleiden tulokset vuotona (ml/min) operointilukumäärän (kpl) muutoksen suhteen.

Operoinnin seurauksena tiivistepintojen pinnankarheuksien tasoittuminen toisiinsa vähensi samassa suhteessa kakkien koekappaleiden vuotoarvoja. Kuitenkin 50 suoritettua operointikerran jälkeen koekappaleiden vuotoarvot tasoittuivat, jonka jälkeen vuototulokset pysyivät lähes muuttumattomina. Operointitestin jälkeen tehtiin silmämääräistä tarkastelua koekappaleiden tiivistepintojen kulumisjäljille. Kuvassa 37 on esitetty vastinlevyn 4.4 tiivistepinta operointitestin jälkeen. Kuvassa 37 nappien muodostama kulumisjälki virtausaukkojen 2 ja 3 kanssa on tasainen, kun virtausaukossa 1 kulumisjälki

on epätasainen. Virtausaukkoa 1 vasten ollut pienemmän ulkohalkaisijan omaava nappi oli kiinnitetty kumilevyjen lisäksi o-rengastiivistyksellä pyörähdyskappaleeseen. Tämän o-rengastiivistyksen lisäksi tiivistepinnan epätasaisen kulumisjäljen syynä voi olla myös vastinlevyn tiivistepinnan epätasomaisuus.



Kuva 37. Operointitestissä käytetyn vastinlevyn 4.4 tiivistepinnan kulumisjäljet 90 operointikerran jälkeen virtausaukot numeroituna.

Kuvassa 38 on esitetty napin 1.5 tiivistepinta operointitestin jälkeen. Napin kiinnitystä pyörähdyskappaleeseen kumilevyjen avulla voidaan pitää onnistuneen, sillä napin tiivistepinnan kulumisjäljen naarmut ovat muodostuneet operointiliikkeen mukaisesti tiivistepinnan yli meneviksi. Tämä osoittaa napin pysyneen paikallaan operoinnin aikana.



Kuva 38. Operointitestissä käytetyn napin 1.5 tiivistepinnan kulumisjälki 90 operointikerran jälkeen.

Käyttönottotestien jälkeen vastinlevyn virtausaukkojen vuotoarvojen vaihtelusta johtuen tiivistepinnan tasomaisuus mitattautettiin. Vastinlevyn 4.4 tiivistepinnan tasomaisuudeksi saatiin 0,183 mm, kun sen työpiirustuksen sallituksi tasomaisuudeksi oli määritetty 0,02 mm. Kuvassa 39 on esitetty aluksi käsin läpätyn vastinlevyn jälkeen koneellisesti osittain hiottu tiivistepinta. Tiivistepinnanprofiilin hiontajälkien perusteella tiivistepinta on kovera ja virtausaukkojen kohdalta alaspäin painunut.



Kuva 39. Hiotun vastinlevyn tiivistepinta. Vastinlevyn ulkokehältä lähdettynä kohti keskipistettä pinnat ovat AISI 316, hiottu kromipinta, läpätty kromipinta ja hiomaton kromipinta.

14 Johtopäätökset

Käyttönottotestien perusteella tässä työssä kehitetty laitteisto on toimintaperiaatteeltaan onnistunut, ja sitä voidaan käyttää tulevaisuudessa venttiilin eri tiivistekijöiden tutkimiseen. Työn kokeellisissa testeissä saadut vuototulokset ovat yhteneviä Hauhian teoreettisen vuotomallin kanssa eri tiivistekijöille. Laitteistolla voidaan tutkia tasomaisen tiivistepinnan materiaalin, pinnankarheuden, pintapaineen, operoinnin, voiteluaineen ja väliaineen paineen sekä lämpötilan vaikutusta vuotoarvoon. Toistettavuustestien avulla saatiin laitteiston antamien vuotoarvojen virhemarginaaliksi ± 12 % verrattaessa kolmea samankaltaista tiivistepintaparia. Työn suurimpana antina, saadun vuotoarvojen virhemarginaalin perusteella, laitteistolla voidaan tutkia yksittäisten venttiilin tiivistekijöiden vaikutusta vuotoon luotettavammin kuin teoreettisia vuotamalleja käyttämällä. Laitteistolla saatujen vuototulosten virhemarginaali muodostui ensisijaisesti koekappaleiden geometrian virheistä. Erityisesti vastinlevyn tiivistepinnan huono tasomaisuus aiheuttaa keskinäisistä tiivistepintojen kontakteista erilaisia ja siten vaihteluja vuototuloksiin. Lisäksi nappien korkeusmitoissa on eroja, jonka johdosta tiivistepintojen kuormituksen jakautuminen voi olla epätasaista. Mahdollisia kuormituseroja tasattiin napin pohjaan liimatuilla kumilevyillä, mikä osoittautui toimivaksi ratkaisuksi myös napin kiinnitykseen pyörähdyskappaleeseen.

Koekappaleiden vuodonmittausta varten onnistuttiin valmistamaan tiivis vuodonmittaussysteemi. Vuodonmittaus paine-eromenetelmällä osoittautui luotettavaksi ja toimivaksi tavaksi mitata vuotoa erilaisissa olosuhteissa. Vuodonmittaussysteemin painetilan pienestä tilavuudesta johtuen menetelmä soveltuu erityisesti pienten vuotomäärien mittaamiseen ja ajallisesti pitkiin testeihin. Vuodon mittausmenetelmän herkkyyks on erittäin hyvä, sillä mittauslaitteisto havaitsee hyvin pienet väliaineen olosuhteiden muutokset. Kuitenkin vuodonmittauksen aikana ympäristön olosuhteet on syytä vakioida, koska väliaineen lämpötilan mittaus toimii hieman viiveellä paineen mittaukseen nähden. Vuototuloksien mittausvirheen välttämiseksi laitteisto on syytä suojata radikaaleilta lämpötilan muutoksilta mittauksen aikana. Jopa auringon valon heijastuminen laitteistoon kesken vuodonmittauksen aikana voi aiheuttaa mittausvirhettä vuototuloksiin. Laitteistolle rakennettu eristekaappi ympäristön lämpötilamuutosten kompensoimiseksi osoitti olevan epäkäytännöllinen käyttönottotestejä suorittaessa, jonka vuoksi sen käyttöä ei pystytty hyödyntämään. Lisäksi mittausvirheen välttämiseksi mittalaitteet tulee

kytkeä päälle noin tuntia ennen tiiviystestien aloittamista, jolla estetään laitteiston lämpenemisestä johtuva mittausparametrien ajautuminen.

Myös ennen vuodonmittauksen aloittamista tulee odottaa noin 5 minuuttia vuodonmittaussysteemin paineistuksen jälkeen, koska paineistuksen yhteydessä väliaineen molekyyliden muodostaman lämpöliikkeen johdosta hetkellisesti väliaineen kaasun lämpötila nousee. Kaasun lämpötilan kasvu vaikuttaa myös paineen arvoon ideaalikaasun tilanyhtälön mukaisesti, jonka vuoksi tarkan väliaineen kaasun lähtömassan määrittämiseksi on syytä vuodonmittaus aloittaa kunnes kaasun lämpötila tasaantuu ympäristön lämpötilaa vastaavaksi.

Laitteistossa käytetty pneumaattinen toimilaite on suorituskyvyltään riittävä koekappaleiden operointiin. Käyttöönottestissä koekappaleiden operoinnissa muodostuneiden tiivistepintojen kulumisjälkien perusteella laitteiston operointitoiminto voidaan katsoa onnistuneeksi, koska haitallinen kuluminen vältettiin. Tämän seurauksena laitteistolla on mahdollista ottaa huomioon vaadittu operoinnin vaikutus tiivistekijöiden tutkimiseen. Napin kiinnitys kahdella kumilevyllä pyörähdyskappaleen upotuksen pohjassa takaa sulkuventtiiliä simuloivan tavan muodostaa oikeanlaista operointikulumisjälkeä tiivistepinnoille. Napin ja pyörähdyskappaleen välisen o-rengastiivistyksen käytöllä ei ole vaikutusta vuototuloksiin. Puolestaan o-rengastiivistyksen käytöstä muodostuneen vastinlevyn epätasaisen operointikulumisjäljen perusteella pienemmän ulkohalkaisijan omaavaa nappia ja o-rengastiivistystä ei ole syytä käyttää. Koekappaleiden operoinnin aikana alhaista liikenopeutta käyttäessä muodostuu tiivistepintojen välistä haitallista tihkomisvärähtelyä. Tihkomisvärähtelyn aiheuttama tiivistepintojen haitallinen kuluminen estetään säätämällä operoinnin liikenopeus riittäväksi magneettiventtiilin paineilman ulostuloissa olevilla kuristimilla.

Laitteiston tiivistepintojen välisen pintapaineen muodostaminen mekaanisesti yhtä säätöä käyttämällä on toimiva. Pintapaineen säädön herkkyys sekä säätöalue ovat riittävät koekappaleiden operointiin ja vuodonmittaukseen. Holkin ja väliholkin väliin asennettu painelaakeri tulee vaihtaa sen asetaalimuovikerroksen kuluessa, koska liukupinnoilla kitkan kasvaminen huonontaa pintapaineen säädön herkkyyttä varsinkin suuria tiivistepintojen välisiä kuormituksia muodostaessa.

15 Tiivistestilaitteiston jatkokehittäminen

Luotettavampien vuototuloksien saamiseksi erityisesti laitteiston koekappaleet vaativat mittamuutoksia. Vastinlevyn paksuuden kasvattaminen tekisi koekappaleesta jäykemmän ja vähemmän alttiin geometrisille virheille sitä valmistettaessa. Vastinlevyä valmistettaessa siihen tehtävät virtausaukonreiät tulisi tehdä ennen vastinlevyn leikkaamista tangoaihiosta. Myös vastinlevyn tiivistepinnan läppääminen riittävän tasomaiseksi voisi tehdä ennen koekappaleen pinnoitusta. Tiivistepinnan läppääminen ennen pinnoitusta olisi nopeampaa suorittaa, koska koekappale on rakennemateriaaliltaan pehmeämpää ja siten alttiimpaa läppäytymiselle kuin pinnoitemateriaali. Koekappaleiden pinnoituksen jälkeen tiivistepinnat voitaisiin läpätä lopullisesti toisiinsa niiden ollessa kiinni runkokappaleissaan. Tällainen laitteistossa kiinni tapahtuva koekappaleiden tiivistepintojen läppäys mahdollistaisi nappien korkeuseroista muodostuvan kuormituserojen eliminoinnin, minkä ansiosta voitaisiin saada miltei täydellisesti toisiaan vastaavat kontaktipinnat eri tiivistepintaparien välillä.

Koekappaleiden läppäämisen yhdistäminen operointitoimintoon edellyttäisi pneumaattisen toimilaitteen korvaamisen sähkökäyttöisellä servomootorilla, jonka liikerataa voitaisiin muuttaa operoinnin edestakaisen sekä läppäyksen jatkuvan pyörittämisen välillä. Tämän kaltaisessa läppäystoiminnossa olisi otettava huomioon, että nappien tulisi pyöriä läppäyksessä myös oman akselinsa ympäri, jotta läppäyksen hiontajäljet eivät muodostuisi tiivistepintojen yli vaan epämääräisesti. Tämä voitaisiin mahdollistaa esimerkiksi planeettavaihteiston toimintoperiaatteen avulla nappien ja koekappaleiden runkokappaleiden välillä. Koekappaleisiin tehtävät mittamuutokset on otettava huomioon niiden runkokappaleiden mitoituksessa sekä laakeroinnissa. Laitteiston huoltotarpeen vähentämiseksi laakeroinnissa pehmeiden liukulaakerien ja painelaakerien sijasta voisi käyttää kestoikänsä pitempiä ja välyksettömiä vierintälaakereita. Vuodonmittauksen luotettavuutta voitaisiin parantaa sijoittamalla laitteisto lämpötilaltaan muuttumattomaan tilaan, jolloin ympäristön lämpötilamuutoksista aiheutuvat mittausrvirheet vuototuloksiin olisivat mahdollisimman pienet. Laitteistolle voisi myös rakentaa erillisen lämpökaapin, jossa lämpötilan muuttaminen mittauksien välillä olisi mahdollista. Lämpökaapin avulla voitaisiin tutkia lämpötilaa yhtenä venttiilin tiivistekijänä. Kaikki yllämainitut toimenpiteet ja laitteiston jatkokehittäminen ovat mahdollisia sekä toteutettavissa Metso Automaation virtauslaboratorion toimesta.

16 Yhteenveto

Venttiilin tiiviyn muuttuminen sen elinkaaren aikana vaikuttaa prosessilaitoksen järjestelmän laatuun ja kustannuksiin. Tässä työssä tiiviydellä kuvataan tiivisteiden ja sulkuelimen välistä niin sanottua venttiilin sisäistä vuotoa. Prosessiteollisuudessa venttiilin sisäinen vuotaminen aiheuttaa rahallisia menetyksiä, jonka vuoksi tiiviysteknologian kehittämisestä on tullut merkittävä kilpailutekijä venttiilimarkkinoilla. Venttiilin sisäisen vuotamisen määrittelevät tiiviystekijät muuttuvat käytön aikana sen operoinnin seurauksena. Venttiilin tiiviys testataan ainoastaan sen kokoonpanon yhteydessä, jonka jälkeen tiiviystekijöiden vaikutuksia venttiilin vuotoon ei todellisuudessa tiedetä. Venttiilin vuodon ennustamiseen on käytetty monia teoreettisia vuotomalleja. Vuotomallien suurien virhemarginaalien vuoksi on tarpeellista suorittaa kokeellista tiiviystekijöiden tutkimista.

Tämän työn tavoitteena on kehittää venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti simuloiva testilaitteisto venttiilin tiiviystekijöiden tutkimiseen. Laitteisto on rajattu sulkuventtiilin tiiviyn tutkimiseen, ja saatujen vuototuloksien avulla vertaillaan tiiviystekijöiden vaikutuksia vuotoon tiivistepintojen operointikulumisen suhteen. Laitteistolla saadut vuototulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia prosessiventtiilin vuotoarvoon, vaan toimivat vertailuarvoina tiiviystekijöiden kesken, joiden tarkoituksena on antaa ohjeita venttiilin suunnitteluun.

Työn teoriaosassa kirjallisuustutkimuksen avulla on selvitetty kattavasti operoinnin vaikutus sulkuventtiiliin, sisäiseen vuotoon vaikuttavat tiiviystekijät ja vuodonmittaamiseen käytetyt menetelmät. Työn kokeellisen osan aluksi on esitetty tuotekehitysprojektin lähtökohtana toiminut staattinen tiiviystestilaitteisto, jolla voidaan testata eri pinnointemateriaalien vaikutusta tiivistepintojen väliseen vuotomäärään. Dynaamisen tiiviystestilaitteiston luonnosteluun käytettiin järjestelmällisen koneensuunnittelun menetelmää. Ennen uuden testilaitteiston luonnostelua kerättiin tietoa tavoitteista ja rajoituksista tiiviystekijöiden tutkimiseen intuitiivisilla ideointimenetelmillä. Tuotekehitysprojektin aikana laitteiston suunnittelutyössä käytettiin apuna tietokoneavusteista suunnittelua.

Tuotekehitysprojektin tuloksena on kehitetty kaksi prototyyppiä dynaamiselle tiivistestilaitteistolle. Prototyyppi 2:lle suoritettiin laitteiston koeponnistus vuodonmittaussysteemin tiiviyn määrittämiseksi ja käyttöönottestit koekappaleiden antamien vuototuloksien luotettavuuden tarkasteluksi. Käyttöönottesteissa valittiin ideaalisimmaksi napin kiinnitystavaksi pyörähdyskappaleeseen kahden kumilevyn ratkaisu. Käyttöönottestien tuloksien perusteella rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan toimivalla laitteistolla saadaan Hauhian malliin verrattuna yhteneviä vuototuloksia käyttämällä venttiilin eri tiivistekijöitä. Laitteistolla voidaan tutkia tasomaisen tiivistepinnan materiaalin, pinnankarheuden, pintapaineen, operoinnin, voiteluaineen sekä väliaineen paineen ja lämpötilan vaikutusta ideaalikaasun vuotoarvoon ± 12 % virhemarginaalilla. Tuotekehitysprojektia voidaan pitää onnistuneen vaatimukseen nähden, koska vuotoarvon ± 12 % virhemarginaalin perusteella tiivistepintojen operoinnin mahdollistavalla laitteistolla voidaan tutkia yksittäisten venttiilin tiivistekijöiden vaikutusta vuotoon luotettavammin kuin teoreettisia vuotamalleja käyttämällä.

Laitteiston jatkokehittämisen avulla voitaisiin pienentää vuototulosten virhemarginaalia. Tiivistestilaitteiston jatkokehittämiseksi erityisesti koekappaleet vaativat mittamuutoksia, jotta samankaltaiset tiivistepintaparit muodostaisivat yhtäläisempiä vuototuloksia. Laitteiston luotettavampien vuototuloksien saamiseksi vastinlevyn tiivistepinnasta tulisi valmistaa tasomaisempi muuttamalla tiivistepintojen läppäystoimintaa. Lisäksi läppäystoiminnon muuttamisella voitaisiin eliminoida nappien korkeuseroista muodostuvat koekappaleiden kuormituserot, minkä ansiosta voitaisiin tuottaa likimain täydellisesti toisiaan vastaavat kontaktipinnat eri tiivistepintaparien välillä.

17 Lähdeluettelo

1. Metso Oyj. Vuosikertomus 2012. Saatavana internetistä osoitteesta <www.metso.com/reports/2012/>. Viitattu 1.5.2013.
2. Metso Oyj. Automaatio-liiketoiminnan esittely. Saatavana internetistä osoitteesta <www.metso.com/fi/corporation/home_fin.nsf/>. Viitattu 1.1.2014
3. Koskinen, J. Neles: Nelimarkan oivalluksista maailman maineeseen. Helsinki: Ajatus, 2003. ISBN 9512065401.
4. Metso Endress+Hauser Oy. Metso venttiilit – Markkinoiden laajin läppäventtiilitarjonta vaativiin sovelluksiin. Kenttäväylä, 2011. Saatavana internetistä osoitteesta <www.kenttavayla.fi/monitori/2011/10/>. Viitattu 1.5.2013.
5. Ollila, J. Metso expands its offering for customers in oil & gas and power industries by acquiring a globe valve technology company in South Korea. Metso Oyj lehdistötiedote, 2012. Saatavana internetistä osoitteesta <www.metso.com/news/newsdocuments.nsf/>. Viitattu 1.5.2013
6. Nyman, J. Elementtimenetelmän soveltaminen palloventtiilin tiiviyyden arviointiin. Licensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo. 1998.
7. Metso Oyj. Neles On-Off valves. Saatavana internetistä osoitteesta <www.metso.com/Automation/valve_prod.nsf/>. Viitattu 1.7.2013
8. 1D71FI. Palloventtiili sarja D. 5. painos. Helsinki: Metso Automation Oy, 2002. 19 s.
9. Smith, P. & Zappe, R. W. Valve selection handbook. 5. painos. Amsterdam: Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-7717-1.
10. Sparig, P. Venttiilikirja. Helsinki: Neles-Jamesbury Oy, 1990. ISBN 951-95409-0-3.

11. 6E20FI. Pneumaattinen kaksoiskalvotoimilaite sarja E. Helsinki: Metso Automation Oy, 2009. 7 s.
12. Kivioja, S. Konetekniikka. 6. painos. Helsinki: Otatieto, 2003. ISBN 951-672-331-4.
13. 2L1220FI. NELDISC -metallitiivisteinen läppäventtiili, sarja L12. 2. painos. Helsinki: Metso Automation Oy, Flow Control, 2008. 7 s.
14. 1M170FI. Palloventtiili MBV sarja M1. 5. painos. Helsinki: Metso Automation Oy, 2002. 24 s.
15. Kivioja, S. , Kivivuori, S. & Salonen, P. Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu. 5. painos. Helsinki: Otatieto, 2007. ISBN 978-951-672-355-9.
16. Laitinen, K. Wear damage prediction of sliding contacts applied to ball valves. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo. 2001.
17. Kirmanen, J. , Niemelä, I. , Pyötsiä, J. , Simula, M. , Hauhia, M. , Riihilahti, J. , Lempinen, V. , Koukkuluoma, J. & Kanerva, P. Flow control manual. 5 painos. Vantaa: Metso Automation Oy, 2011. ISBN 952-9773-12-9.
18. Aalto yliopisto. Opetusmoniste Ke-42.1700 Kemian laitetekniikka I Virtaustekniikka, 2010. 44 s.
19. Chern, M.-J. , Wang, C.-C. & Ma, C.-H. Performance test of flow visualization of ball valve. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007. Vol. 31. S. 505-512.
20. Wiksten, R. Lämpövoimaproessit. 4. painos. Helsinki: Otatieto, 2009. ISBN 978-951-672-365-8.
21. Antila, A.-M. , Karppinen, M. , Leskelä, M. , Mölsä, H. & Pohjakallio, M. Tekniikan kemia. 6. painos. Helsinki: Edita Publishing Oy, 2002. ISBN 951-37-3738-1.

22. Hauhia, M. Palloventtiilin vuodonmallinnus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo. 1996.
23. Dubost, J. & Blanc, F. A way to prevent leakages from cryogenic bolted flanges. Vienna: Gastech, 1996. Vol. 2. S. 1-14.
24. FCI 70-2-2013. Control valve leakage. Cleveland: Fluid Control Institute Inc, 2013. 4 s.
25. Sarinko, P. Kaksiakselisen palloventtiilin tiivisteratkaisun kehittäminen kryolosuhteisiin. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto. Espoo. 1995.
26. T-1128FI. Koeponnistuskäytäntö. Helsinki: Metso Automation Oy, Flow Control, 2002. 10 s.
27. Roth, A. Vacuum Technology. 2. painos. Amsterdam: Nort-Holland, 1983. ISBN 0-444-86027-4.
28. Saxholm, S. & Rantanen, M. Paineen mittaus. Mittatekniikan keskus, 2011. Vol. 1. S. 1-38. ISSN 1235-2704.
29. Keskinen, K. I. Kemian laitetekniikan taulukoita ja piirroksia. 12. painos. Helsinki: Otatieto, 2009. ISBN 978-951-672-069-5.
30. Korhonen, U. & Vihinen, S. Lämpöoppi. 7. painos. Espoo: Otakustantamo 206, 1985. ISBN 951-671-231-2.
31. Weckström, T. Lämpötilan mittaus. Mittatekniikan keskus, 2002. Vol. 1. S. 1-101. ISSN 1235-5704.
32. Wexon Oy. Kuva Muellerin Pt100 -antureista. Saatavana internetistä osoitteesta <www.wexon.fi/tuotteet/lampotila/lampotila-anturit/pt100-anturit>. Viitattu 1.10.2013.

33. Pahl, G. & Beitz, W. Koneensuunnitteluoppi. Porvoo: Metalliteollisuuden Kustannus Oy, 1990. ISBN 951-817-468-7.

Liiteluettelo

Liite 1. Staattisen tiiviystestilaitteiston testitulokset. 1 sivu.

Liite 2. Dynaamisen tiiviystestilaitteiston vaatimuslista. 2 sivua.

Liite 3. Vaatimuslistan abstrahointi. 2 sivua.

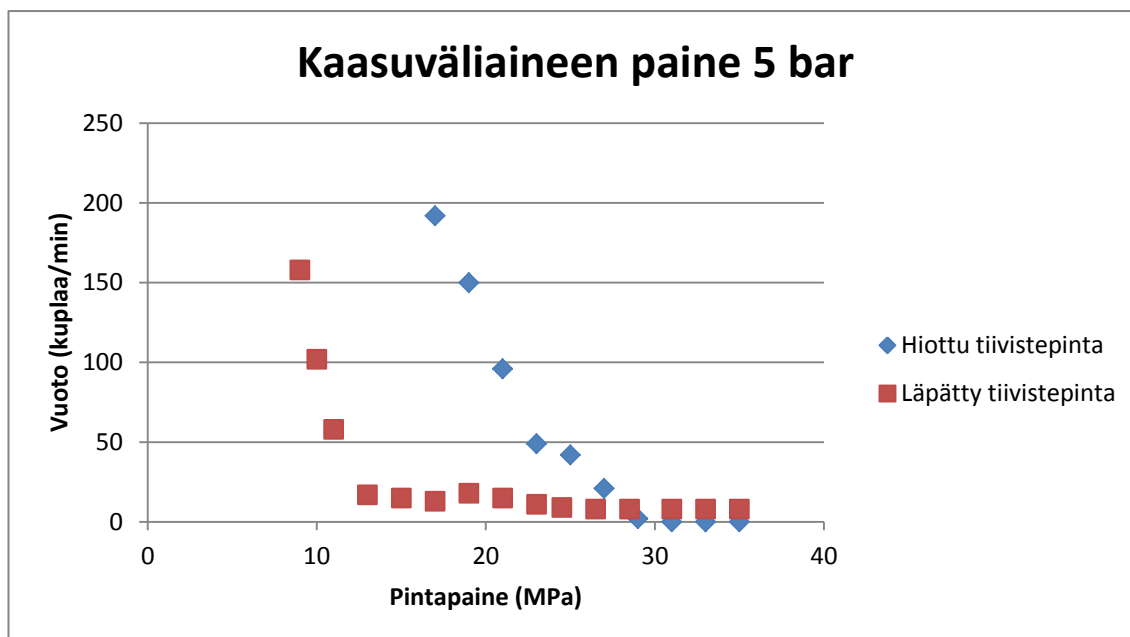
Liite 4. Vertailuun valitut sopivat periaateyhdistelmät. 1 sivu.

Liite 5. Periaateyhdistelmien pistearviointi. 1 sivu.

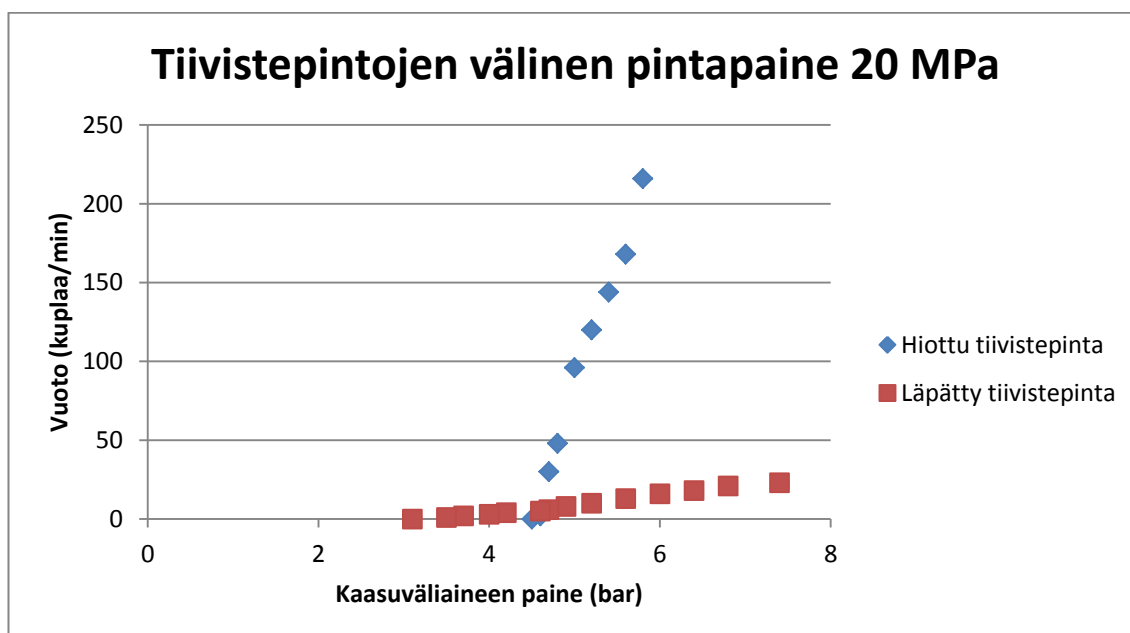
Liite 6. Ensimmäisen prototyypin testien vuototulokset. 2 sivua.

Liite 7. Toisen prototyypin räjäytyskuva ja osaluettelo. 1 sivu.

Liite 1. Staattisen tiivistestilaitteiston testitulokset



NiBo -pinnoitettujen koekappaleiden tiivistepintojen vuotoarvot ovat mitattu tilavuusvirrata (kuplaa/min). Vuotoarvot on esitetty sekä hiotuille että läpättyille tiivistepinnoille. Mittaussarjassa kaasuväliaineen eli paineilman paine on vakio 5 bar. Puolestaan tiivistepintojen välinen pintapaine (MPa) on muuttuvana tekijänä mittaussarjassa.



NiBo -pinnoitettujen koekappaleiden tiivistepintojen vuotoarvot ovat mitattu tilavuusvirrata (kuplaa/min). Vuotoarvot on esitetty sekä hiotuille että läpättyille tiivistepinnoille. Mittaussarjassa tiivistepintojen välinen pintapaine on vakio 20 MPa. Puolestaan kaasuväliaineen paine (bar) on muuttuvana tekijänä mittaussarjassa.

Liite 2. Dynaamisen tiiviystestilaitteiston vaatimuslista

9.4.2013
KV/VV/T

TIIVIYSTEESTILAITTEISTON VAATIMUSLISTA VAATIMUS

Sivu 1

1. GEOMETRIA

- KV Laitteiston koekappaleiden suuruudet ovat oltava mahdollisimman pienet.
T Koekappaleiden tiivistepinnat ovat oltava tasopintoja.

2. KINEMATIikka

- KV Laitteiston on oltava dynaaminen systeemi eli operoiva.
KV Operoinnin liiketapa on oltava edestakainen.
KV Liikesuunnan tulee simuloida venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti.
KV Operoinnin liikematkan on mentävä yli virtausaukon.
T Operoinnin liikenopeus on oltava säädettävissä.

3. VOIMAT

- VV Koekappaleiden tiivistepintojen välinen pintapaine on oltava säädettävissä 0-150 MPa välillä.
KV Koekappaleiden on kestävä niiden kuormituksesta aiheutuvat muodonmuutokset.
KV Laitteiston on oltava riittävän tuettu ja vakaa värähtelyn välttämiseksi.

4. ENERGIA

- VV Väliaineen paine on oltava säädettävissä välillä 0-50 bar.
VV Kuuma- ja kylmätestit mahdollisia välillä -196...+400 °C tulevaisuudessa laitteistoa lisä rakentaen.
KV Operointi tulee tapahtua koneellisesti.
KV Kitkan aiheuttaman lämpötilan muutokset ovat otettava huomioon laitteiston konstruktiassa.

5. AINE

- KV Laitteiston rungon materiaali on oltava teräs.
KV Virtaavana väliaineena on oltava kaasu.

6. SIGNAALI

- KV Laitteiston mittaustekniikka tulee toimia yksinkertaisilla signaaleilla.
KV Signaalien seuranta ja tallentaminen suoritetaan PC:llä.
KV Vuodon mittausmenetelmän on oltava luotettava ja helppokäyttöinen.
- VV Vähimmäisvaatimus
KV Kiinteä vaatimus
T Toivomus

9.4.2013 THIVIYTESTILAITTEISTON VAATIMUSLISTA
KV/VV/T VAATIMUS

Sivu 2

7. TURVALLISUUS

- KV Laitteisto tulee suunnitella turvallisesti käyttäjälle inhimillisiä virheitä silmällä pitäen.
- KV Laitteiston tulee kestää väliaineen paine sekä puristusvoimasta aiheutuva kuormitus.
- KV Laitteistossa ei saa olla teräviä reunoja.
- KV Laitteiston on oltava riittävän vahva operoinnin kestämiseen.

8. VALMISTUS

- KV Laitteiston rakenteen on oltava yksinkertainen.
- KV Koekappaleisiin voidaan tehdä eri pinnoitteita, pinnankarheuksia sekä tiivistepinnan leveyksiä.
- KV Koekappaleiden on oltava edullisia valmistaa.
- KV Pinnoitettujen tiivistepintojen reunojen hankaaminen operoitaessa on minimoitava.

9. TARKASTUS

- VV Laitteisto on tarkastettava ennen käyttöönottoa suorittamalla koeponnistus 1,5-kertaisella laitteiston maksimi väliaineen paineella.

10. ASENNUKSEEN

- KV Koekappaleet tulee pystyä asemoimaan toisiinsa nähden aina samankaltaisesti.
- KV Koekappaleet tulee sovittaa tarkasti runkoon ja toisiinsa nähden helpon asennettavuuden takaamiseksi.

11. KÄYTTÖ

- VV Laitteiston on kestävä vähintään miljoona operointia.
- KV Testituloksissa on pyrittävä pieneen vaihteluväliin.
- KV Samoilla koekappaleilla on tehtävä toistuvia testejä.
- KV Valevuotoreittien muodostuminen on estettävä.

12. KUNNOSPITO

- KV Kuluvien koneenosien huolto on oltava mahdollinen suorittaa.

13. KUSTANNUKSET

- VV Koekappaleiden on oltava edullisia.

- VV Vähimmäisvaatimus
KV Kiinteä vaatimus
T Toivomus

Liite 3. Vaatimuslistan abstrahointi

Tiivistestilaitteen vaatimuslista on abstrahoitu askelittain tuotekehitysprojektin oleellisten ongelmien tunnistamiseksi.

Abstrahoinnin tulos 1. ja 2. askeleen jälkeen:

- Laitteiston on oltava dynaaminen systeemi eli operoiva.
- Operoinnin liiketapa on oltava edestakainen.
- Liikesuunnan tulee simuloida venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti.
- Operoinnin liikematkan on mentävä yli virtausaukon.
- Operoinnin liikenopeus on oltava säädettävissä.
- Koekappaleiden tiivistepintojen välinen pintapaine on oltava säädettävissä 0-150 MPa välillä.
- Väliaineen paine on oltava säädettävissä välillä 0-50 bar.
- Operointi tulee tapahtua koneellisesti.
- Virtaavana väliaineena on oltava kaasu.
- Vuodon mittausten menetelmän on oltava luotettava ja helppokäyttöinen.
- Laitteisto tulee suunnitella turvallisesti käyttäjälle inhimillisiä virheitä silmällä pitäen.
- Laitteiston tulee kestää väliaineen paine sekä puristusvoimasta aiheutuva kuormitus.
- Laitteiston on oltava riittävän vahva operoinnin kestämiseen.
- Laitteiston rakenteen on oltava yksinkertainen.
- Koekappaleisiin voidaan tehdä eri pinnoitteita, pinnankarheuksia sekä tiivistepinnan leveyksiä.
- Koekappaleet tulee pystyä asemoimaan toisiinsa nähden aina samankaltaisesti.
- Koekappaleet tulee sovittaa tarkasti runkoon ja toisiinsa nähden helpon asennettavuuden takaamiseksi.
- Laitteiston on kestävä vähintään miljoona operointia.
- Valevuotoreittien muodostuminen on estettävä.
- Koekappaleiden on oltava edullisia.

Abstrahoinnin tulos 3. askeleen jälkeen:

- Laitteiston on oltava operoiva.
- Operoinnin liiketapa on oltava edestakainen.
- Liikesuunnan tulee simuloida venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti.
- Operoinnin liikematkan on mentävä yli virtausaukon.
- Operoinnin liikenopeus on oltava säädettävissä.
- Koekappaleiden tiivistepintojen välinen pintapaine on oltava säädettävissä.
- Väliaineen paine on oltava säädettävissä.

- Operointi tulee tapahtua koneellisesti.
- Virtaavana väliaineena on oltava kaasu.
- Vuodon mittausmenetelmän on oltava luotettava ja helppokäyttöinen.
- Laitteisto tulee suunnitella turvallisesti käyttäjälle.
- Laitteiston tulee kestää sitä kuormittavat voimat.
- Laitteiston on oltava riittävän vahva operoinnin kestämiseen.
- Laitteiston rakenteen on oltava yksinkertainen.
- Koekappaleisiin voidaan tehdä eri pinnoitteita, pinnankarheuksia sekä tiivistepinnan leveyksiä.
- Koekappaleet tulee pystyä asemoimaan toisiinsa nähden aina samankaltaisesti.
- Koekappaleet tulee sovittaa tarkasti runkoon ja toisiinsa nähden helpon asennettavuuden takaamiseksi.
- Valevuoreittien muodostuminen on estettävä.
- Koekappaleiden on oltava edullisia.

Abstrahoinnin tulos 4. askeleen jälkeen:

- Laitteiston koneellisesti suoritettava operointi tulee simuloida venttiilin operointia mahdollisimman todenmukaisesti.
- Koekappaleiden tiivistepintojen välinen pintapaine on oltava säädettävissä.
- Väliaineekaasun paine on oltava säädettävissä.
- Vuodon mittausmenetelmän on oltava luotettava.
- Laitteisto tulee suunnitella turvallisesti käyttäjälle.
- Rakenteeltaan yksinkertaisen laitteiston tulee kestää sitä kuormittavat voimat.
- Edullisiin koekappaleisiin voidaan tehdä eri pinnoitteita, pinnankarheuksia sekä tiivistepinnan leveyksiä.
- Koekappaleiden asemointi toisiinsa nähden ja helppo asennettavuus on mahdollistettava.

Abstrahoinnin tulos 5. askeleen jälkeen (ongelman muotoilu lauseeksi):

Erilaisten ja edullisten koekappaleiden tiivistepintojen välistä kaasuväliaineen vuotoa mitataan luotettavasti ja turvallisesti venttiilin operointia simuloivalla laitteistolla säädettävillä venttiilin vuotoon vaikuttavilla tekijöillä.

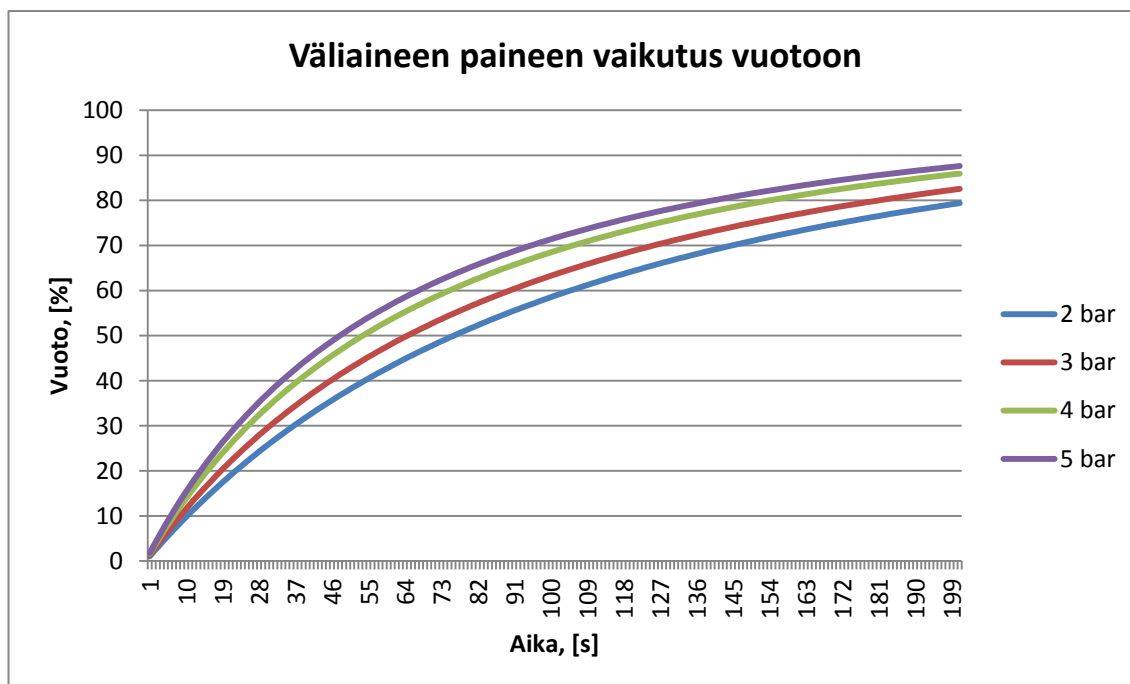
Liite 4. Vertailuun valitut sopivat periaateyhdistelmät

Periaateyhdistelmä 1	Periaateyhdistelmä 2	Periaateyhdistelmä 3	Periaateyhdistelmä 4
Pallomainen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta
Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin
Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen
Sähköinen	Sähköinen	Sähköinen	Sähköinen
Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine
Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus
Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä
Periaateyhdistelmä 5	Periaateyhdistelmä 6	Periaateyhdistelmä 7	Periaateyhdistelmä 8
Pallomainen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta
Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin
Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen
Pneumaattinen	Pneumaattinen	Pneumaattinen	Pneumaattinen
Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine
Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus
Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä	Massaspektrometrimenetelmä
Periaateyhdistelmä 9	Periaateyhdistelmä 10	Periaateyhdistelmä 11	Periaateyhdistelmä 12
Pallomainen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta
Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin
Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen
Sähköinen	Sähköinen	Sähköinen	Sähköinen
Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine
Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus
Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä
Periaateyhdistelmä 13	Periaateyhdistelmä 14	Periaateyhdistelmä 15	Periaateyhdistelmä 16
Pallomainen tiivistepinta	Pallomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta	Tasomainen tiivistepinta
Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin	Hydraulinen puristin	Mekaaninen puristin
Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen	Rotaationaalinen
Pneumaattinen	Pneumaattinen	Pneumaattinen	Pneumaattinen
Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine	Ylipaine
Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus	Vastuslämpötilamittaus
Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä	Paine-eromenetelmä

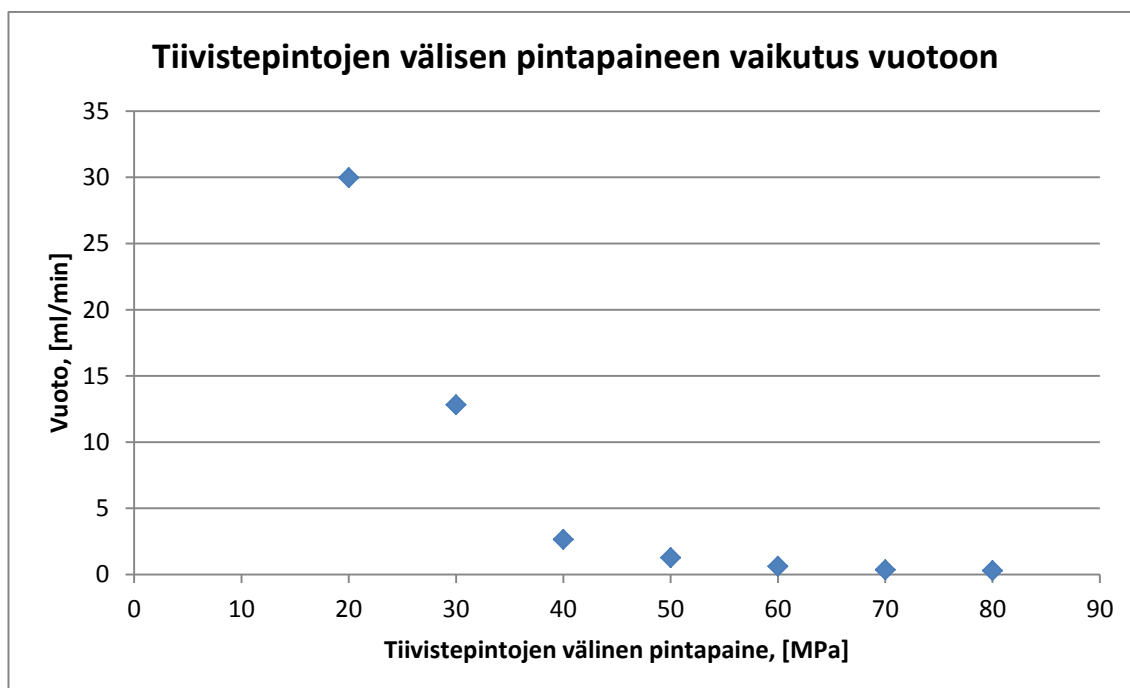
Liite 5. Periaateyhdistelmien pistearviointi

Arvostelukriteerit	gi	PY 1		PY 2		PY 3		PY 4		PY 5		PY 6		PY 7		PY 8	
		wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj
Laitteisto helposti kokoonpantava	0,08	4	0,32	5	0,4	5	0,4	6	0,48	5	0,4	6	0,48	6	0,48	7	0,56
Laitteiston operointi simuloi venttiiliä	0,14	8	1,12	8	1,12	6	0,84	6	0,84	10	1,4	10	1,4	8	1,12	8	1,12
Laitteiston rakenne yksinkertainen ja vahva	0,1	5	0,5	7	0,7	6	0,6	8	0,8	5	0,5	6	0,6	5	0,5	7	0,7
Laitteistoa helppo käyttää	0,06	4	0,24	5	0,3	5	0,3	6	0,36	3	0,18	4	0,24	4	0,24	5	0,3
Koekappaleet edullisia valmistaa	0,14	2	0,28	2	0,28	7	0,98	7	0,98	2	0,28	2	0,28	7	0,98	7	0,98
Koekappaleiden kestävyys	0,08	7	0,56	7	0,56	5	0,4	5	0,4	8	0,64	8	0,64	6	0,48	6	0,48
Vähän kuluvia osia	0,02	6	0,12	5	0,1	5	0,1	4	0,08	7	0,14	6	0,12	6	0,12	5	0,1
Kuluvien osien vaihdettavuus	0,02	3	0,06	5	0,1	5	0,1	7	0,14	4	0,08	6	0,12	6	0,12	8	0,16
Vähän ulkoisia häiriöitä	0,04	5	0,2	7	0,28	7	0,28	9	0,36	4	0,16	6	0,24	6	0,24	8	0,32
Käyttäjistä riippumaton turvallisuus	0,12	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08	7	0,84	7	0,84	7	0,84	7	0,84
Laaja painealue	0,04	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24
Laaja lämpötila-alue	0,04	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36
Vuodonmittausmenetelmä luotettavuus	0,12	6	0,72	6	0,72	6	0,72	6	0,72	6	0,72	6	0,72	6	0,72	6	0,72
	Σ	1	5,64	6,24	6,24	6,24	6,84	5,78	6,28	6,28	6,88						
Arvostelukriteerit	gi	PY 9		PY 10		PY 11		PY 12		PY 13		PY 14		PY 15		PY 16	
		wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj	wj	gi*wj
Laitteisto helposti kokoonpantava	0,08	4	0,32	5	0,4	5	0,4	6	0,48	5	0,4	6	0,48	6	0,48	7	0,56
Laitteiston operointi simuloi venttiiliä	0,14	8	1,12	8	1,12	6	0,84	6	0,84	10	1,4	10	1,4	8	1,12	8	1,12
Laitteiston rakenne yksinkertainen ja vahva	0,1	5	0,5	7	0,7	6	0,6	8	0,8	4	0,4	6	0,6	5	0,5	7	0,7
Laitteistoa helppo käyttää	0,06	7	0,42	8	0,48	8	0,48	9	0,54	6	0,36	7	0,42	7	0,42	8	0,48
Koekappaleet edullisia valmistaa	0,14	2	0,28	2	0,28	7	0,98	7	0,98	2	0,28	2	0,28	7	0,98	7	0,98
Koekappaleiden kestävyys	0,08	7	0,56	7	0,56	5	0,4	5	0,4	8	0,64	8	0,64	6	0,48	6	0,48
Vähän kuluvia osia	0,02	7	0,14	6	0,12	6	0,12	5	0,1	8	0,16	7	0,14	7	0,14	6	0,12
Kuluvien osien vaihdettavuus	0,02	3	0,06	5	0,1	5	0,1	7	0,14	4	0,08	6	0,12	6	0,12	8	0,16
Vähän ulkoisia häiriöitä	0,04	4	0,16	6	0,24	6	0,24	8	0,32	3	0,12	5	0,2	5	0,2	7	0,28
Käyttäjistä riippumaton turvallisuus	0,12	7	0,84	7	0,84	7	0,84	7	0,84	5	0,6	5	0,6	5	0,6	5	0,6
Laaja painealue	0,04	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36	7	0,28	9	0,36
Laaja lämpötila-alue	0,04	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24	4	0,16	6	0,24
Vuodonmittausmenetelmä luotettavuus	0,12	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08	9	1,08
	Σ	1	5,92	6,52	6,52	7,12	5,96	6,56	6,56	7,16							

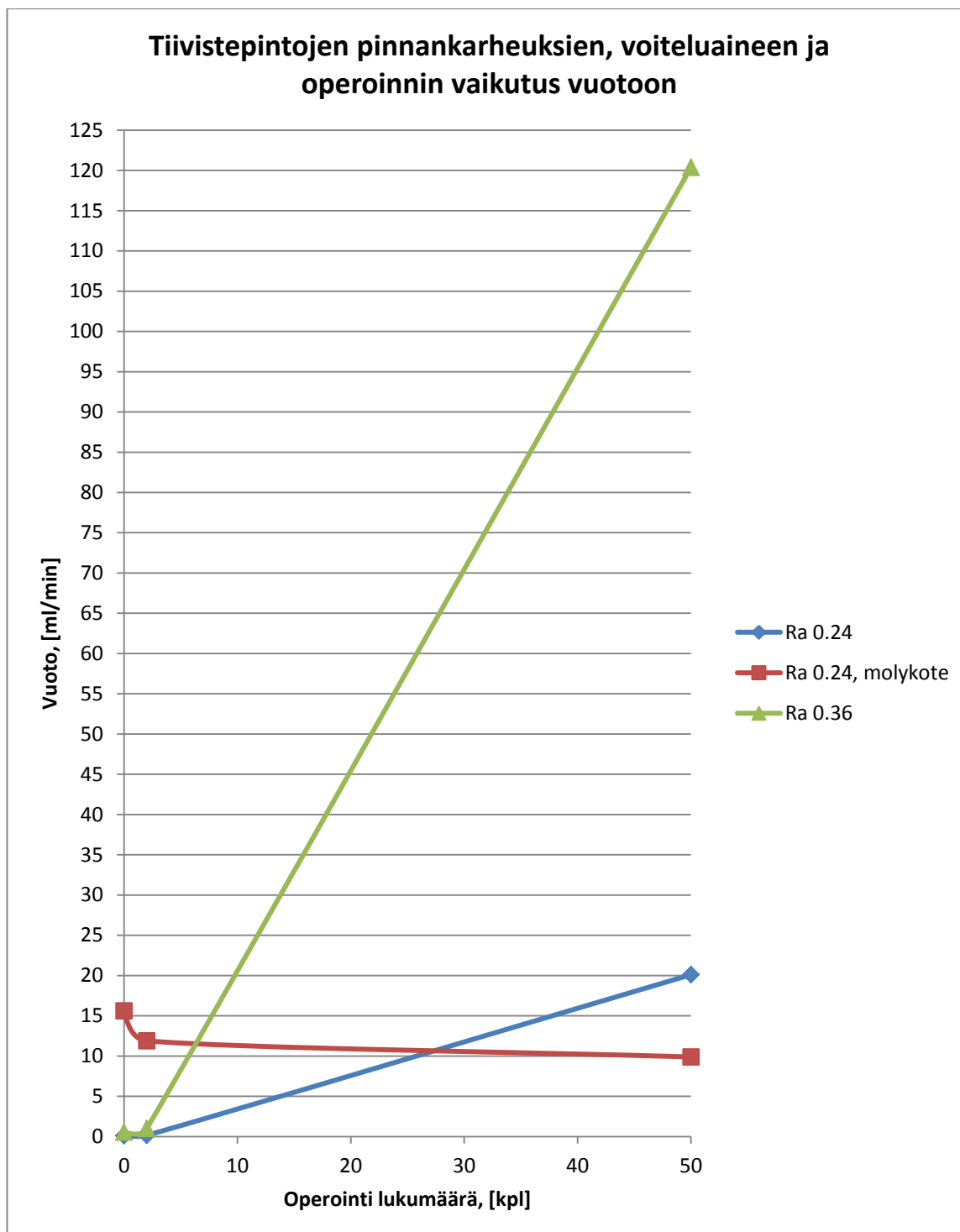
Liite 6. Ensimmäisen prototyypin testien vuototulokset



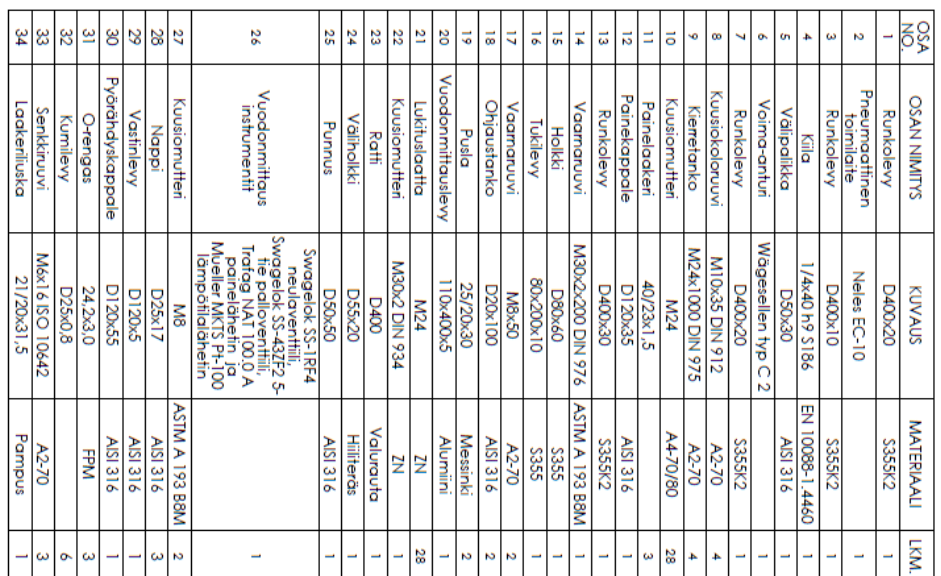
Tiivistepintojen välistä vuotoa on mitattu eri paineilman paineilla. Testin ajan tiivistepintojen välinen pintapaine oli 80 MPa sekä pinnakarheet olivat Ra 0.24. Vuoto (%) on esitetty prosentteina kaasun lähtömassasta ajan (s) suhteen.



Tiivistepintojen välistä vuotoa on mitattu eri niiden välisillä pintapaineilla. Testin ajan paineilman paine oli 5 bar ja pinnankarheet olivat Ra 0.24. Vuoto (ml/min) on esitetty tilavuusvirtana tiivistepintojen välisen pintapaineen (MPa) suhteen.



Tiivistepintojen välistä paineilman vuotoa on mitattu eri pinnankarheuksilla. Yhden tiivistepintaparin välissä käytettiin voiteluaineena Molykote D-321R liukulakkaa. Testin ajan väliaineen paine oli 3 bar. Vuodonmittauksessa tiivistepintojen välinen pintapaine oli 80 MPa ja operoinnissa 10 MPa. Vuoto (ml/min) on esitetty tilavuusvirtana tiivistepintojen operointi lukumäärän (kpl) suhteen. Yhden edestakaisen operointiliikkeen kesto oli 4 sekuntia.



UNITED STATES OFFICE OF INTELLIGENCE INFORMATION						FORM NO.		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TITLE											
AUTHOR											
DATE											
CLASSIFICATION											
SUBJECT											
DISTRIBUTION											
PROJECT											
SCALE											
Prototypipi 2											
A2											